# KWANTECHIZM

CZYLI

## KLATKA NA LUDZI

ANDRZEJ DRAGAN

fabuła fraza
WYDAWNICTWO

# KWANtechizm

CZYLI

## KLATKA NA LUDZI

ANDRZEJ DRAGAN

fabuła fraza
WYDAWNICTWO

WARSZAWA

Warszawa 2019
Copyright © by Fabuła Fraza
Copyright © by Andrzej Dragan

Redakcja: Dariusz Wilczak

Projekt okładki i rysunki: Andrzej Dragan

Opracowanie graficzne i skład: Dymitr Miłowanow

Zdjęcie autora: Kasia Świerkowska

Korekta: Alicja Kobel

ISBN: 978-83-65411-34-1

Fabuła Fraza Sp. z o.o.
www.fabulafraza.pl
biuro@fabulafraza.pl

Konwersja publikacji do wersji elektronicznej

# SPIS TREŚCI

Dedykacja

Przed spożyciem

ROZDZIAŁ PIERWSZY – obrót czasoprzestrzeni

ROZDZIAŁ DRUGI – hipnoza

ROZDZIAŁ TRZECI – dlaczego kury ruszają głowami?

ROZDZIAŁ CZWARTY – klatka na ludzi

ROZDZIAŁ PIĄTY – horyzont zdarzeń

ROZDZIAŁ SZÓSTY – planeta cieni

ROZDZIAŁ SIÓDMY – czy diabeł gra w kości?

ROZDZIAŁ ÓSMY – jak głęboko sięga świat kwantowy?

ROZDZIAŁ DZIEWIĄTY – fizyka będzie skończona za pół roku

ROZDZIAŁ DZIESIĄTY – komputery kwantowe, kryptografia i teleportacja

ROZDZIAŁ JEDENASTY – czas i niepamięć

ROZDZIAŁ DWUNASTY – teoria kwantowa vs czarne dziury

ROZDZIAŁ TRZYNASTY – jak się powiedziało A, trzeba powiedzieć Ą

ROZDZIAŁ CZTERNASTY – nie znam się, to się wypowiem

Słowniczek fizyczno-polski

Dla Igora, mojego synka

# PRZED SPOŻYCIEM

MAŁE DZIECI KARMIONE SĄ dwiema substancjami: mlekiem i kłamstwem. Kiedy nowa istota chce dowiedzieć się czegoś o świecie, do którego trafiła, hodujemy ją w przeświadczeniu, że pani w przedszkolu jest dobra, a dzielni policjanci łapią złych złodziei. I tak dalej. Dopiero potem wszystko stopniowo odkłamujemy. Gdyby zacząć od razu z grubej rury, biedne dziecko i tak niczego nie zrozumie, a nam będzie głupio. Komunikacja wymaga braku ścisłości.

To nie jest typowa książka popularno-naukowa. To jest zupa-śmietnik zawierająca moje prywatne i niezbyt ortodoksyjne spojrzenie na najciekawsze aspekty mechaniki kwantowej, teorii względności oraz współczesnej fizyki, którymi od lat się zajmuję. Czasem przytaczam rozumowania i argumenty, które uważam za smakowite, a częściej po prostu opowiadam historyjki, które sprawiły, że coś do mnie dotarło.

Jestem fanem edukacji, lecz niekoniecznie edukacjonizmu, więc całość da się śledzić bez jakiejkolwiek wiedzy naukowej. Ważniejsze jest umiejętne gospodarowanie zdrowym rozsądkiem, bo współczesna fizyka potrafi solidnie szokować. Ceną jest użycie przeze mnie różnych pożytecznych oszustw, pozwalających przedstawić istotę omawianych zagadnień nieco na skróty. Trochę tak, jak często myślą o nich fizycy, ale się do tego nie przyznają. Zresztą nawet gdyby cały obecny stan naszej wiedzy o świecie zebrać i nie wiem jak precyzyjnie wyrazić, to i tak dostalibyśmy

zbiór przybliżeń lub nonsensów. Bo ostateczna teoria wszystkiego, jeśli w ogóle istnieje, z całą pewnością nie jest nam znana.

Dziękuję Kasi Kausie, Szymonowi Charzyńskiemu, Annie Dragan, Pawłowi Jakubczykowi, Arturowi Opali, Maćkowi Tomczakowi, Łukaszowi Turskiemu i Krzyśkowi Turzyńskiemu za czytanie i krytykowanie.

Autor

# ROZDZIAŁ PIERWSZY

## *obrót czasoprzestrzeni*

HISTORIA ŻYCIA NA ZIEMI to jakieś parę miliardów lat. Historia naszej cywilizacji to najwyżej kilkadziesiąt tysięcy lat. Oznacza to, że wkład, jaki wnosimy w historię życia na naszej planecie (będącej skądinąd pyłkiem na skraju jednej z dziesięciu miliardów galaktyk), jest mniej więcej taki, jak wkład rozdeptanej muchy umieszczonej na czubku Pałacu Kultury do jego wysokości.

Z punktu widzenia Ziemi, którą matematyk Hugo Steinhaus nazywał „kulą u nogi", gatunek ludzki jest więc najwyżej niesfornym epizodem. Podczas jego trwania niemal cała aktywność intelektualna naszej populacji orbitowała wokół kwestii przydatności do spożycia okolicznej fauny i flory. Być może z dumą myślimy o wytworach naszej cywilizacji. Warto jednak pamiętać, że w s z y s t k o, co człowiek kiedykolwiek zbudował, z piramidami, wieżą Eiffla oraz Jezusem ze Świebodzina włącznie, zmieściłoby się wewnątrz kostki sześciennej pięć na pięć na pięć kilometrów. Co prawda niektórzy twierdzą, że *wybudowali sobie pomnik trwalszy niż ze spiżu, strzelający nad ogrom królewskich piramid*. Ja tam jednak nie oburzam się na słynnego antropologa, Desmonda Morrisa, który nasz gatunek określał słodkim mianem *nagiej małpy*.

A jednak całkiem niedawno naga małpa doznała gwałtownej erekcji intelektualnej. W ciągu zaledwie czterystu lat od nasilenia

się jej objawów naga małpa zdołała wystrzelić swojego przedstawiciela na Księżyc, zbudować komputer oraz dokonać teleportacji kwantowej stanu pojedynczego fotonu na odległość ponad stu kilometrów. A w wolnej chwili zbadała dziedziczność tego, czy krowa, spożywając trawę, kręci swoją żuchwą zgodnie czy też przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.

Cóż doprowadziło do tego nagłego skoku rozwojowego, którego owoce przypadło nam konsumować? Okazuje się, że przyczyną całego zamieszania była zaproponowana w czasach Galileusza i Kartezjusza niezwykle prosta recepta życiowa, którą wzięła sobie do serca skromna garstka przedstawicieli naszego gatunku. Bertrand Russell receptę tę streszcza następująco:

*Chcę przedłożyć czytelnikowi do życzliwego rozważenia doktrynę, która, jak się obawiam, może się wydać niesłychanie paradoksalna i wywrotowa. Według tej doktryny jest rzeczą niepożądaną wierzyć jakiemuś twierdzeniu, gdy nie ma żadnej podstawy do przypuszczenia, że jest ono prawdziwe. Muszę naturalnie przyznać, że gdyby takie mniemanie stało się powszechne, przeistoczyłoby zupełnie nasze życie społeczne i nasz ustrój polityczny; ponieważ obydwa są idealne, musi to być policzone na jego niekorzyść. Zdaję sobie również sprawę z czegoś o wiele ważniejszego, a mianowicie z tego, że wpływałoby ono na zmniejszanie się dochodów wróżbitów, bookmakerów, biskupów i innych ludzi, żyjących z irracjonalnych nadziei tych, którzy nic nie uczynili, aby uzyskać szczęście na tym lub tamtym świecie.*

Przedstawiona metoda poznawania rzeczywistości sprowadza się do wątpienia i dociekliwego sprawdzania wszystkiego, co da się sprawdzić. To tyle. Żadnej wiary w opinie lub prawdy objawione. No bo w zasadzie nie da się „udowodnić” żadnego prawa przyrody.

A żeby którekolwiek podważyć, wystarczy podać zaledwie jeden kontrprzykład.

Jak na przykład udowodnić, że jutro rano po raz kolejny wzejdzie Słońce? Nie wynika to przecież wcale z faktu, że w trakcie poprzednich paru tysięcy lat z rzędu Słońce co dzień rano wstawało. A wystarczyłoby zaobserwować tylko jedną taką sytuację, w której Słońce nie wzeszło o poranku, żeby prawo o codziennym wstawaniu Słońca zostało bezpowrotnie sfalsyfikowane. No i należałoby wówczas stosownie zmodyfikować prawa przyrody.

Tak właśnie działa metoda naukowa – nie poprzez udowadnianie czegokolwiek, bo się przecież nie da, a przez nieustające próby podważania tego, co aktualnie wiemy o świecie. Tak zwane „fundamentalne prawa fizyki" to po prostu zbiór twierdzeń, które p ó k i c o nie zostały empirycznie podważone. Fizycy wcale w owe prawa nie „wierzą", lecz przyjmują je do wiadomości, jako tymczasowy model rzeczywistości, zgodny z dotychczasowymi obserwacjami. Niczego nie możemy być pewni stuprocentowo. Niektóre znane prawa przyrody wydają się bardziej p r a w d o p o d o b n e od innych, część z nich obowiązuje tylko w pewnym zakresie zjawisk, poza którym ulegają one załamaniu, jeszcze inne są tylko pewnymi przybliżeniami. Jest tu spora różnorodność. Tym bardziej, pod karą smoły i pierza, powinno się zabronić używania absurdalnego określenia „udowodnić naukowo", które jest nie tylko zwykłym oksymoronem, ale bezczelnym zaprzeczeniem samej i d e i nauki. Nauka niczego nie „udowadnia", a jedynie bada konsekwencje hipotez, które dotąd nie zostały przez nikogo skutecznie podważone. A jeśli zostały, to się nikt nie obraża, tylko wszyscy zaczynają szukać od nowa.

W matematyce mówi się co prawda o „dowodzie matematycznym" jakiegoś twierdzenia. Jednak chodzi tu tylko

o badanie konsekwencji różnych założeń czy aksjomatów. A ich się już nie „udowadnia", bo nie ma jak, tylko przyjmuje za punkt wyjścia w prowadzonych rozważaniach. Założenia te mogą być kompletnie abstrakcyjne, nie mieć żadnego związku z rzeczywistością bądź nawet jej przeczyć. Nie ma to najmniejszego znaczenia dla poprawności samego „dowodu matematycznego". Zresztą praw logiki i wnioskowania też się nie udowadnia, tylko przyjmuje w formie aksjomatów wywiedzionych z naszego doświadczenia.

Receptę na ciągłe wątpienie i niebranie niczego na wiarę wziął sobie do serca najwyżej promil naszej populacji, ale i to wystarczyło, by błyskawicznie odkryć teorię ewolucji, teorię względności i mechanikę kwantową. Błyskawicznie w porównaniu z tempem rozwoju naszej cywilizacji osiąganym w trakcie poprzednich tysiącleci, gdy obowiązującą doktryną badawczą była wiara w prawdy objawione.

To, że metoda badania świata, oparta na ciągłym wątpieniu i kwestionowaniu, doprowadziła do spektakularnego sukcesu, nie jest szczególnie zaskakujące. W drugim rozdziale okaże się, co trzeba zrobić, żeby nakłonić człowieka do wiary w zupełnie dowolną, choćby najbardziej absurdalną tezę. Wiary, której człowiek ten będzie zawzięcie bronić. I to powinno wystarczyć do przekonania się, że ludzkie wierzenia nie są zbyt miarodajnym wyznacznikiem prawdy nawet w najprostszych kwestiach. Nie wspominając o fundamentalnych zagadnieniach, o których nie mamy zielonego pojęcia.

Z powodów tych gorąco zalecam pogodzenie się ze stanem faktycznym: nie jesteśmy stworzeniami n a z b y t przenikliwymi. Świnia na przykład, na której wielu z nas opiera swoją dietę, jest zwierzęciem całkiem rozsądnym. Brytyjscy naukowcy badali, jak często różne zwierzęta giną rozjechane przez samochód w trakcie przechodzenia przez jezdnię, w stosunku do liczby podjętych prób. W zestawieniu najbezpieczniej zachowujących się zwierząt to właśnie świnia zajęła pierwsze miejsce. Człowiek uplasował się na miejscu czwartym.

Jeśli zapytać kogokolwiek, jaka będzie grubość kartki papieru złożonej na pół pięćdziesiąt razy (przy założeniu, że dysponujemy odpowiednio dużym arkuszem), co usłyszymy? Udzielana odpowiedź rzadko przekracza kilkanaście centymetrów. No więc jakiej grubości byłaby kartka złożona na pół pięćdziesiąt razy?

Poprawna odpowiedź to ponad sto milionów k i l o m e t r ó w grubości. Czyli dwie trzecie odległości od Ziemi do Słońca. Sto milionów kilometrów! Wynik ten otrzymujemy, mnożąc grubość pojedynczej kartki papieru, czyli mniej więcej 0,1 mm przez liczbę kartek otrzymaną w wyniku pięćdziesięciokrotnego składania. A ta podwaja się przy każdym kolejnym złożeniu arkusza na pół:

$$2 \times 2 \times 2 \times \ldots (\text{i tak 50 razy}) \ldots \times 2 \times 0{,}1\text{mm} = 2^{50} \times 0{,}1\text{mm}$$

Otrzymany wynik jest ogromny, bo 2 podniesione do potęgi 50 daje liczbę większą niż milion miliardów. Widać na podstawie tego przykładu, że ludzie nie do końca opanowali jeszcze sztukę mnożenia liczb przez dwa. Być może z tego właśnie powodu chętniej zabierają głos w kwestiach, w których czują się b a r d z i e j kompetentni. Na przykład w sprawach związanych

ze źródłem wszechrzeczy. Uzasadniając przy tym stawiane przez siebie tezy o porządku świata swoją wiarą.

Angielska prasa nazywa grę w totolotka podatkiem od głupoty. Już nawet nie chodzi o to, jak gracze reagują, gdy zasugerować im, żeby obstawili liczby 1, 2, 3, 4, 5, 6, które, nie wiedzieć czemu, „przecież" nigdy nie wypadną. Tłumaczenie, że taka kombinacja jest równie nieprawdopodobna, jak jakakolwiek inna, oczywiście do nikogo nie trafia. Wiele „systemów" gry w totolotka opartych jest na rozpowszechnionym przypuszczeniu, że prawdopodobieństwo ponownego wylosowania zestawu liczb, które raz już wcześniej padły, jest znacząco obniżone. Spotkałem się nawet z opinią, że miejsce na Ziemi, w którym dopiero co wybuchła bomba, staje się przez to bezpieczniejsze, bo prawdopodobieństwo wybuchu dwóch bomb w tym samym miejscu jest przecież znikome. Osobom dzielącym się ze mną tym spostrzeżeniem najczęściej zalecam, żeby siadały tylko na tych ławkach w parku, które zostały suto obsrane przez ptaki. Bo tam, gdzie znajduje się sto ptasich śladów, prawdopodobieństwo trafienia kolejną dwójką powinno być już mikroskopijne.

Biorąc pod rozwagę niezliczone podobne przykłady popularnych wierzeń, strategia naukowa, polegająca na ciągłym podawaniu w wątpliwość i sprawdzaniu ludzkich opinii, wydaje się, mówiąc delikatnie, wysoce uzasadniona. Na marginesie można zresztą dodać, że postawa pełna zwątpienia jest wyrazem pokory, jaką winniśmy okazywać przyrodzie w obliczu naszej spektakularnej ignorancji. W przeciwieństwie do wiary opartej na przekonaniu o czyjejś nieomylności.

My tu sobie gadu-gadu, a tymczasem ojciec i matka *mechaniki kwantowej,* Niels Bohr, zapytany kiedyś, czy wierzy, że podkowa,

którą umieścił nad wejściem do domu, przynosi mu szczęście – odpowiedział:

*Naturalnie, że nie. Ale powiedziano mi, że podkowa działa nawet wtedy, gdy się w nią nie wierzy.*

†††

W czasach studenckich postanowiłem nauczyć się czytać szybko. Ludzie czytają zazwyczaj z prędkością jakichś trzystu słów na minutę, czyli stronę tekstu w minutę. Przeciętny człowiek mówi do siebie w myślach, co czyta, dlatego nie jest w stanie czytać szybciej, niż mówi. A nikt na Ziemi nie umie mówić szybciej niż trzysta słów na minutę. Gdyby jednak pozbyć się z głowy niepotrzebnego głosu, ograniczenie to przestałoby przecież obowiązywać. I stąd rekord świata w szybkości czytania wynoszący dwadzieścia pięć t y s i ę c y słów, czyli prawie sto stron książki na minutę.

Tak więc uczyłem się szybkiego czytania. Zależało mi na jak najszybszym dotarciu do zawartości, a samo czytanie uważałem jedynie za niedoskonałą metodę transferu tej zawartości do wewnątrz głowy. Zatem pierwszą rzeczą, której musiałem się pozbyć, był wewnętrzny głos, którym mówiłem do swoich myśli w trakcie żarcia tekstu.

Czytanie jest aktywnością przestarzałą i kosztowną. Przeciętna książka ma kilkaset tysięcy liter. Procesor w smartfonie ma kilka m i l i a r d ó w tranzystorów, a jest tylko sto razy droższy. Oznacza to, że każda litera w książce jest sto razy droższa niż najnowocześniejszy tranzystor. Poprzednie osiem stron kosztowało więcej niż milion tranzystorów!

Tak czy owak, wykonywałem różne ćwiczenia, które pomagają w szybszym czytaniu. Część z tych ćwiczeń służy do poszerzenia pola widzenia. Dzięki nim widzi się nie tylko to, co leży bezpośrednio przed oczami, ale także całą okolicę. Szerokie pole widzenia pomaga ograniczyć ruchy oczami, które również niepotrzebnie spowalniają czytanie.

Moje ćwiczenia wyglądały tak: na środku kartki znajdował się rząd kropek od góry do dołu, a po lewej i prawej stronie każdej kropki napisana była jakaś litera. Należało skupić wzrok na kropce i nie odrywając go, odczytywać napisane z boku litery. Nie wolno było przy tym ani na moment ruszyć oczami. Z początku litery były dość blisko kropek i zadanie wydawało się łatwe, ale stopniowo umieszczane były coraz dalej i dalej na boki. Aż wreszcie zamieniały się w odległe układy złożone z kilku liter. Na przykład takich:

Wykonanie każdego kolejnego ćwiczenia wymagało coraz większego wysiłku, bo litery po bokach wydawały się coraz bardziej zamazane. Pierwszą turę ćwiczeń, na której początkowo chciałem poprzestać, wykonałem dość szybko. Dlatego od razu przystąpiłem do drugiej. Po skończeniu kolejnej porcji uznałem, że mi smakuje i nie będę jeszcze przerywał. Po dwóch godzinach przerobiłem wszystkie ćwiczenia, które miałem w mojej książce z ćwiczeniami. Trochę kręciło mi się w głowie, ale wciąż nie chciało mi się kończyć.

Na środku książki, pomiędzy stronami, dopisałem więc własne kropki i patrząc na nie, zacząłem czytać litery na sąsiednich stronach.

W ten sposób spędziłem kolejnych parę godzin, aż wreszcie dotarło do mnie, że jak każdej tresowanej małpie, mnie również należy się wreszcie jakiś p o s i ł e k. Mieszkałem wtedy w szarym, obdrapanym pokoju na warszawskiej Pradze. Podniosłem wzrok znad książki i rozejrzałem się po pokoju. To co stało się ze mną tuż potem, pamiętam do dziś.

Poczułem się jak ż a b a, która ma oczy po bokach. Wyraźnie widziałem wszystko wokół siebie, i to bez ruszania głową! Poczułem, jakbym uległ gwałtownej degradacji w hierarchii łańcucha pokarmowego, bo zwierzyna łowna, w przeciwieństwie do drapieżników, ma szeroki rozstaw oczu. Oczy umieszczone wąsko lepiej wspomagają widzenie stereoskopowe, dając lepszą percepcję głębi, ale oczy rozstawione szeroko pomagają najpełniej obserwować otoczenie. Żeby jak najszybciej dostrzec ryzyko stania się cudzym posiłkiem. I w ten sposób zapomniałem, że jestem głodny.

Stawanie się żabą było mi już znane. Gdy w podstawówce czytałem książkę Hoimara von Ditfurtha „Na początku był wodór", którą dostałem od taty, z każdym kolejnym rozdziałem czułem, że się przepoczwarzam. Dotarła do mnie trywialność mechanizmów ewolucyjnych działających poprzez dobór naturalny, natrafiłem na niezwykłe wyjaśnienie, dlaczego bez obecności Księżyca życie na Ziemi w znanej nam formie nie mogłoby powstać i nie byłoby zorzy polarnej. Oraz dlaczego kury w czasie chodzenia ruszają głowami. Było to wszystko tak nowe i oszałamiające, że podnosząc oczy znad książki i gapiąc się na Konin, znany z tego, że spośród wszystkich ówczesnych miast wojewódzkich znajdował się na drugim miejscu pod względem wykształcenia mieszkańców (od końca), czułem się trochę, jak po nadmiernej porcji ćwiczeń na poszerzenie pola widzenia.

Jakiś czas później natrafiłem na nieznane mi wyprowadzenie równań teorii względności, z którego wynikało, że nawet zwykły, niepozorny ruch jest „obrotem czasoprzestrzeni". Byłem tak zafascynowany, że musiałem sobie obiecać, że w trakcie przechodzenia przez ulicę nie będę o tym myśleć.

Wychodzenie na zewnątrz głowy zaczęło sprawiać mi coraz więcej trudu. Czytałem jeszcze więcej, a ponieważ robiłem to w autobusach, pociągach, na przystankach, wymyślałem najróżniejsze sposoby pozwalające unikać rozkojarzenia. Któregoś razu zauważyłem na przykład, że czytanie książki do góry nogami skutecznie odcina wszystkie zewnętrzne bodźce, zmuszając mózg do nieoczekiwanego wysiłku. Zacząłem więc czytać książki do góry nogami i robiłem to do momentu, aż mój mózg zupełnie się do tego przyzwyczaił. Z tego powodu często wychodziłem na kretyna, który nie potrafi nawet właściwie trzymać książki. Szczególnie mi to nie przeszkadzało.

W końcu zamówiłem do konińskiej księgarni podręcznik fizyki, o którym słyszałem, że jest niezły, a z którego uczyli się studenci. Nie bardzo wiedziałem, jak się z czegoś takiego korzysta, nie było nawet z kim o tym pogadać, więc potraktowałem książkę jak każdą i przebrnąłem od deski do deski przez dwa opasłe tomiska Hallidaya & Resnicka. Okazało się potem, że moje podejście do nauki było dość ekscentryczne, bo podręczników fizyki nie czyta się w ten sposób. Studenci innych wydziałów dostają często do wykucia materiał kilkuset stron w ciągu trzech dni, podczas gdy studenci fizyki uczą się nieraz zawartości kilku stron podczas miesiąca.

W ten sposób dowiedziałem się jednak kolejnej ważnej rzeczy: że nieodłącznym towarzyszem w nauce fizyki jest ciągła f r u s t r a c j a. Ucząc się od zera, zacinałem się co chwila na tym

czy innym problemie, który należało samodzielnie rozwiązać. W zasadzie po dwudziestu pięciu latach niewiele się u mnie zmieniło i nadal czuję się jak małpa, próbująca dosięgnąć ręką zbyt wysoko wiszącego banana. Łaska olśnienia, żeby spróbować patykiem leżącym obok, przychodzi niespiesznie, dopiero jak już dam się fizyce solidnie przeczołgać.

A jednak jakimś cudem stałem się psychopatą i wszystko inne przestało mnie obchodzić. Parę rozdziałów dalej wyjaśnię dlaczego. Dokupiłem jeszcze zbiór 1500 zadań Kruczka i rozwiązałem wszystkie w czasie dwutygodniowych ferii zimowych, nie robiąc w zasadzie niczego poza tym. Starałem się trzymać dzienną średnią na poziomie 100 zadań. A skoro już miałem okazję, postanowiłem przy tym przeprowadzić na sobie różne eksperymenty. Ciekawiło mnie na przykład, jak długo będę w stanie wytrzymać rozwiązywanie zadań bez snu ani jakiegokolwiek odpoczynku. Po 48 godzinach, kiedy pojawiły się pierwsze halucynacje, uznałem, że rozsądnie będzie przerwać eksperyment.

†††

Fizyka odkleiła mnie od reszty świata. Aby nieco naświetlić niektóre przyczyny, napiszę o przykładzie, który mocno podziałał na moją wyobraźnię. W pierwszej pracy Einsteina o teorii względności była mowa o tym, że czas na zegarze, który porusza się z dużą prędkością, płynie wolniej, a rakieta poruszająca się z dużą prędkością skraca się wzdłuż kierunku, w którym leci. Efekty te robią się bardziej zauważalne, gdy ruch zbliża się do prędkości światła. Światła, które w ciągu sekundy mogłoby okrążyć Ziemię siedmiokrotnie. Doświadczane na co dzień prędkości są dużo mniejsze, więc nie dostrzegamy tych dziwacznych efektów, ale

w skalach kosmicznych sprawa robi się poważna i zegary n a p r a w d ę chodzą wolniej! Co dziwniejsze, ani poruszający się zegar, ani lecąca szybko rakieta, nie mają zielonego pojęcia, że podlegają spowolnieniu upływu czasu albo skróceniu długości. No bo przecież z ich punktu widzenia one same spoczywają, a cały świat porusza się w przeciwną stronę. I według nich to wszystkie inne zegary, a nie one same, chodzą wolniej, a cały poruszający się świat ulega skróceniu. Oto pozornie paradoksalna konsekwencja względności ruchu.

Innym ciekawym efektem, o którym pisał Einstein, jest względność równoczesności. Wyobraźmy sobie dwa zdarzenia zachodzące w tej samej chwili, ale w różnych miejscach. Niech na przykład pierwszym zdarzeniem będzie złożenie jajka przez kurę we wsi pod Koninem, a drugim zdarzeniem wyklucie się kurczaka z innego jajka we wsi pod Warszawą. Przyjmijmy, że oba te zdarzenia zaszły równocześnie: gdzieś złożone zostało jajko, a gdzie indziej z innego jajka wykluła się kura. Okazuje się, że jeśli będziemy obserwować świat z poruszającego się pojazdu, to jedno z tych zdarzeń zajdzie jako pierwsze, a drugie dopiero po chwili. Kolejność zależy od kierunku, w którym będziemy jechać. Jeśli ktoś jadący w prawo stwierdzi, że najpierw było konińskie jajko, a potem wykluła się warszawska kura, to ktoś jadący w lewo uzna, że najpierw była kura, a dopiero później jajko. No i według teorii względności żaden z punktów widzenia nie jest lepszy od pozostałych. Żeby było jasne: nie chodzi o to, że informacje o zdarzeniach docierają do nas z opóźnieniem, które zależy od tego, gdzie się znajdujemy. Nic z tych rzeczy. Chodzi o to, że pojęcie „t e r a z" zmienia swoje znaczenie, gdy zaczynamy się ruszać. „Teraz" jest względne.

Jeśli komuś nie chce się wierzyć, to zapewne dlatego, że w większości codziennych sytuacji te efekty są tak niewielkie, że nie da się ich zauważyć gołym okiem. Jesteśmy przyzwyczajeni do niewielkich skal. Użyteczne jednostki odległości to „stopa", „łokieć" albo „ryczenie wołu" (czyli odległość, z której jeszcze słychać ryczącą rogaciznę). Natomiast pojęcie teraźniejszości zaczyna ulegać zmianie dopiero w trakcie ruchu z prędkością zbliżoną do prędkości światła. Albo w skalach kosmicznych, bo wówczas prędkości nie muszą być duże. Dla przykładu, jeśli z prędkością starej baby na rowerze pojedziemy w stronę gwiazdy oddalonej od nas o sto lat świetlnych, to spowodujemy, że stanie się ona starsza o mniej więcej minutę (gwiazda, nie baba). A gdy pojedziemy w przeciwnym kierunku, gwiazda o minutę odmłodnieje. Takie są wnioski z teorii względności.

Nie ma się co dziwić, że wielu fizyków zareagowało na pracę Einsteina wrogo. Powstała nawet książka „Stu autorów przeciwko Einsteinowi", w której na sto sposobów „udowadniano", dlaczego twórca teorii względności gada bzdury. Gdy ten dowiedział się o owej publikacji, słusznie zauważył, że gdyby wszyscy owi naukowcy mieli rację, wystarczyłby jeden.

Minęło trochę czasu, zanim eksperymentalnie potwierdzono przewidywania teorii względności, a starsze pokolenie fizyków nieco ochłonęło lub po prostu wymarło. Einstein zaś stał się celebrytą. Ale nie o tym chciałem pisać.

Można na wiele różnych sposobów zrozumieć źródło wszystkich tych nieintuicyjnych konsekwencji teorii względności. W większości są to sposoby dość zawiłe, a jeden z nich podał zresztą sam Einstein w swojej pracy. Lecz czasem można odnaleźć drogę prowadzącą do wyniku, która okazuje się jeszcze ciekawsza niż sam wynik.

Coś takiego zdarzyło się w 1907 roku, czyli tuż po opublikowaniu pierwszej pracy Einsteina, i właśnie t o odkrycie tak podziałało mi na wyobraźnię. Tego roku dawny nauczyciel Einsteina, Herman Minkowski, przedstawił swój sprytny nowy sposób patrzenia na teorię względności. Cóż takiego zauważył Minkowski? Równania otrzymane przez Einsteina, z których wynikają wszystkie zaskakujące przewidywania teorii względności, opisują, jak się zmienia czas i położenie różnych zdarzeń, gdy obserwujemy je, będąc w ruchu. Gdyby ktoś był ciekawy, równania wyglądają tak:

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2}} \qquad t' = \frac{t - Vx}{\sqrt{1 - V^2}}$$

Stephen Hawking stwierdził co prawda, że umieszczanie jakiegokolwiek matematycznego równania w popularnej książce zmniejsza liczbę czytelników o połowę, ale Hawking stwierdził przy innej okazji, że fizyka zostanie ukończona do końca XX wieku, więc może nie ma się czym przejmować.

Powróćmy do Minkowskiego. Zwrócił on uwagę, że powyższe równania do złudzenia przypominają inne równania, znane z elementarnej szkolnej geometrii. A mianowicie równania opisujące obrót układu współrzędnych o pewien kąt, które wyglądają tak:

$$x' = \frac{x - At}{\sqrt{1 + A^2}} \qquad t' = \frac{t + Ax}{\sqrt{1 + A^2}}$$

Wystarczy zerknąć i porównać, podobieństwo jest uderzające! Różnica między równaniami jest tylko taka, że prędkość $V$ obserwatora (zapisana jako ułamek prędkości światła) w równaniach teorii względności jest zastąpiona tangensem $A$ kąta, o który obrócony jest układ współrzędnych. Jest też we wzorach inna subtelna modyfikacja: zamiast znaku minus w trzech miejscach znajduje się znak plus. Ta obserwacja nie dawała Minkowskiemu spokoju. Czyżby z matematycznego punktu widzenia ruch był po prostu pewnym rodzajem... obrotu? Ale niby obrotem c z e g o?! Pytanie to wymagało z pewnością oderwania się intelektualnie od żucia gumy.

Problem postawiony został dość abstrakcyjnie, więc jedynymi obiektami, które pojawiły się w rozważaniach i mogły w trakcie ruchu podlegać obrotowi, były czas $t$ i przestrzeń $x$ występujące w równaniach! Minkowski wprowadził więc pojęcie *czasoprzestrzeni* i ogłosił, że to, co odczuwamy jako ruch, może być w istocie ujęte matematycznie, jako pewien specyficzny obrót owej czasoprzestrzeni. Ze względu na różnicę w znakach pojawiających się w równaniach, ten dość nietypowy obrót nazywany jest *obrotem hiperbolicznym*. Ale ma on wiele właściwości najzwyklejszych obrotów znanych z codziennego życia. A co jest najciekawsze w tej obserwacji poza tym, że brzmi ona dość nieprawdopodobnie? Otóż to, że jeśli zacisnąć zęby i przyjąć ją za punkt wyjścia, to prawie wszystkie wnioski płynące z teorii względności stają się wręcz banalne!

Zapomnijmy na moment o teorii względności i wyobraźmy sobie, że trzymamy w ręku kij. Każdy kij ma dwa końce (z wyjątkiem procy). Czy oba końce kija są równo oddalone? Chwila na zastanowienie. No cóż, nasze pytanie nie ma sensu. To tak, jak by zapytać: czym się różni wróbelek? Aby nadać pytaniu sens,

trzeba najpierw doprecyzować: od czego mają być równo oddalone końce naszego kija? No bo mogą one być równo oddalone od czyjegoś lewego oka, ale wówczas od prawej pięty już raczej nie. Wystarczy obrócić kij i sytuacja ulega zmianie.

Jeżeli ruch rzeczywiście jest pewnym obrotem czasoprzestrzeni, to pytanie, czy dwa zdarzenia są równoczesne, czy nie, jest tak samo pozbawione sensu, jak pytanie, czy dwa końce kija są równo oddalone! Musimy najpierw sprecyzować, względem którego obserwatora.

Według jednego obserwatora najpierw było jajko, a potem kura, a dla innego, poruszającego się obserwatora, najpierw była kura, a dopiero potem jajko. A dla jeszcze innego kura i jajko pojawiły się na świecie równocześnie. I nie ma tu żadnej sprzeczności. Podobnie jak nie ma sprzeczności pomiędzy tym, że według jednego obserwatora pierwszy koniec kija jest bliżej, a z punktu widzenia innego obserwatora, według którego kij jest obrócony, to drugi koniec może być bliżej. Nie ma nawet sensu pytać, który z obserwatorów ma rację. Istota teorii względności jest naprawdę aż tak prosta.

Trzymajmy się myślowo kija. Jego długość też zależy od punktu widzenia. Fotograf robiący kijowi zdjęcie pod pewnym kątem stwierdzi, że na fotografii kij wyszedł krótszy niż wówczas, gdy kij jest równoległy do matrycy aparatu. I takim samym zmianom ulega długość czasu zmierzonego na zegarze, względem którego się ruszamy! Zgodnie ze sformułowaniem Minkowskiego, ruszając się, obracamy całą czasoprzestrzeń, a więc odcinki czasu odmierzane przez poruszający się względem nas zegar ulegną skróceniu. Co oznacza, że zegar po prostu będzie chodzić wolniej. Jest to wniosek, który Einstein skrupulatnie wydedukował ze swoich równań, lecz my, dzięki temu, że interpretujemy ruch jako obrót

czasoprzestrzeni, możemy się tego spodziewać b e z wykonywania jakichkolwiek obliczeń. Coś pięknego!

Ponieważ w wyniku ruchu obraca się cała czasoprzestrzeń, czyli nie tylko oś czasu, ale również oś przestrzeni, podobnie skrócenie musi dotyczyć też fizycznej długości ruchomych ciał. Gdy więc jedzie rower, to będzie on spłaszczony wzdłuż kierunku, w którym się porusza. Niecodzienny ów wniosek polecam do rozważenia wszystkim, którzy czytając te słowa, podróżują akurat dowolnym środkiem lokomocji wyposażonym w okna.

Pomysł Minkowskiego jest może łatwy do sformułowania, ale wymaga wzmożonego trawienia organem, który nosimy 15 cm z tyłu nosa. Nie potrafię myśleć bardzo szybko i pamiętam, że po tym, jak przeczytałem o obrotach czasoprzestrzeni, odzyskanie równowagi psychicznej zajęło mi ze dwa tygodnie. Tym bardziej że obrotu czasoprzestrzeni, o którym mądra książka pisała dość lekko, za nic nie potrafiłem sobie wyobrazić. Pocieszałem się, że moja percepcja przestrzenna ewoluowała głównie po to, żebym jak najskuteczniej rozstrzygał, które spośród okolicznych organizmów wielokomórkowych są jadalne, a które wręcz przeciwnie i najwyżej w tym mogę być dobry. I nie po to moi niedoszli przodkowie ginęli w wyniku selekcji naturalnej, żebym intuicyjnie pojmował zjawiska zachodzące, gdy poruszam się z prędkością zbliżoną do prędkości światła. A dopiero wówczas ów obrót hiperboliczny, o którym pisał Minkowski, staje się zauważalny. Bo dla niewielkich prędkości, z którymi mamy do czynienia na co dzień, ruch w dobrym przybliżeniu wydaje się po prostu niewinną zmianą położenia obiektów w czasie.

Okazało się jednak, że do wszystkiego można się przyzwyczaić. Więc i ja w końcu się przyzwyczaiłem, że ruch po prostu j e s t niewyobrażalnym obrotem czasoprzestrzeni. I zapomniałem, że jest

to coś dziwnego. Było to dla mnie o tyle łatwiejsze, że teoria względności do swojego zrozumienia nie wymaga nawet minimum wiedzy matematycznej, której wówczas nie posiadałem. Pomysł Minkowskiego, jeśli już się z nim pogodzić, pozwala pojąć najistotniejsze konsekwencje teorii względności, nawet dysponując niewiedzą wręcz encyklopedyczną.

Moja prywatna czasoprzestrzeń również uległa obróceniu: zdecydowałem, że będę studiować fizykę, a gdy ktoś mnie pytał, co mam zamiar robić po takich studiach, odpowiadałem, że będę pracować fizycznie.

Wszystkie przewidywania teorii względności zostały potwierdzone w niezliczonych eksperymentach, a mimo to nasza reakcja na nią, nawet po ponad stu latach od odkrycia, może rodzić najróżniejsze powikłania umysłowe. W moim przypadku były to nieomal łzy radości. U niektórych zdarzają się jednak łzy smutku, ale najczęściej są to po prostu łzy konsternacji...

# ROZDZIAŁ DRUGI

## *hipnoza*

NA PIERWSZYM ROKU STUDIÓW wylądowałem w grupie, która okazała się anomalią w skali całej historii Uniwersytetu Warszawskiego. A mogłaby nią być zapewne i na jakiejkolwiek innej uczelni na świecie. Ja zaś mogłem wreszcie sprawdzić w warunkach bojowych, co mi przyszło z samodzielnej nauki. I w końcu pogadać z kimś o fizyce, bo w Koninie wszyscy mieli mnie już dosyć.

Na pierwszej godzinie pierwszego wykładu z analizy matematycznej nasz profesor spojrzał z kwaśną miną na salę wypełnioną grupami 14 i 15 i powiedział: *widzę, że jest tu dziś państwa bardzo dużo*. Po czym zamilkł, pokręcił głową i zrobił groźną minę. *Ale proszę państwa, to się wkrótce zmieni... bo widzicie państwo... ten wykład będzie jak lot samolotem.* Po czym zawiesił głos i po odczekaniu teatralnej pauzy dokończył z uśmiechem: *lot na bardzo wysokim poziomie.*

Ten sam profesor, jakieś pięć lat później, zaprosił mnie do wygłoszenia na wydziale matematyki referatu o mechanice kwantowej. Było to spore wyzwanie, bo ów profesor słynął z trzaskania drzwiami w trakcie referatów z mechaniki kwantowej, której nie znosił. Wystąpienie rozpocząłem od przytoczenia cytatu z inauguracji mojej kariery naukowej, na temat lotu na wysokim poziomie. Zastrzegłem jednak, że mój referat będzie raczej

przypominał rejs łodzią podwodną. Chciałem nieco rozruszać towarzystwo, ale miny matematyków ani drgnęły.

Najważniejszą rzeczą, która zostaje po studiach fizyki, to obycie z ciągłą frustracją, że ten czy inny problem jest zbyt trudny do ogarnięcia. Na szczęście, w miarę upływu czasu, uczenie się rozumienia nowych rzeczy i walka z problemami wymagającymi niestandardowego rozwiązania zaczynają wchodzić w nawyk. A wciąż powracające zatwardzenie myślowe staje się chlebem powszednim. Nic więc dziwnego, że srogi odsiew w trakcie studiów fizyki jest nieunikniony.

Ja jednak trafiłem do bardzo nietypowej grupy. Nie dość, że niemal cała grupa 15 ukończyła rzeczony kurs analizy matematycznej i cały pierwszy rok, a z kilkoma wyjątkami również całe studia. Okazało się, że spośród 30 studentów z mojej grupy ponad 25 zrobiło doktoraty, habilitacje, profesury i obecnie pracują oni jako wybitni w swoich dziedzinach fizycy, na najróżniejszych uczelniach w całym świecie. Kilku z nich zasiedla nawet pokoje na tym samym piętrze, co ja. Takie zrządzenie losu nie wydarzyło się w żadnym innym roczniku. Po pierwszym roku zdecydowałem się przenieść od razu na trzeci, robiąc dwa lata studiów naraz, ale zdążyłem w międzyczasie poznać się i zżyć z całą tą menażerią najciekawszych i najzdolniejszych okazów, jakie dane mi było kiedykolwiek wcześniej poznać.

†††

Mniej więcej w tym czasie jeden z moich kolegów ze studiów zwierzył mi się, że zajmuje się hobbystycznie hipnozą i zdążył ją skutecznie przetestować na różnych znajomych. W dodatku... zaraz, zaraz... co?!

Muszę w tym miejscu powiedzieć coś więcej o fizykach. Być może jesteśmy awangardą wśród upośledzonych społecznie, a naszym znakiem rozpoznawczym jest zespół Aspergera, ale z całą pewnością o wiele trudniej jest nam wcisnąć k i t. Pytam więc gościa, co też wygaduje? A on mi na to: jak nie wierzysz, to sam sobie sprawdź, masz tu książkę. Naucz się i spróbuj na kimś.

O koledze miałem jak najlepsze mniemanie, zresztą obecnie jest on już szanowanym profesorem. Uznałem więc, że sprawa jest warta zbadania, i zacząłem drążyć temat, bo nie miałem najmniejszego zamiaru wierzyć mu na słowo.

Gdyby ktoś opowiedział mi o tym, co wydarzyło się później, po prostu puknąłbym się w głowę. I, szczerze pisząc, nie oczekiwałem jakiejkolwiek innej reakcji od ludzi, którym później tę historię opowiadałem. A było tak. Zacząłem czytać różne opracowania na temat hipnozy oraz metod wprowadzania w nią. Gdy już się tego najadłem, postanowiłem przekonać się, ile z tego jest bujdą, robiąc najróżniejsze eksperymenty na znajomych. Wolałem wyrobić sobie własną opinię, a nie wierzyć temu, co ktoś wypisuje. Doprowadziło mnie to do sformułowania na własne potrzeby kilku wniosków.

Po pierwsze, ludzie nie bardzo w ogóle wiedzą, na czym polega trans hipnotyczny i jakie są jego źródła. Co prawda, niektórzy coś na ten temat mówią, ale rzadko mają coś do powiedzenia. Wiadomo natomiast, że hipnoza jest zjawiskiem całkiem powszechnym. Każdy człowiek samoczynnie wpada w stan autohipnozy wiele razy dziennie, zazwyczaj nie będąc tego nawet świadomym. Tak po prostu zaprogramowany jest nasz mózg. Gdy czytając długi tekst, nagle zdajemy sobie sprawę, że kompletnie nie pamiętamy kilku poprzednich stron, a w dodatku nie wiemy nawet, o czym przez cały ten czas myśleliśmy – prawdopodobnie właśnie

ocknęliśmy się z transu hipnotycznego. Podobne sytuacje zdarzają się każdemu codziennie. Wiele razy dziennie. Tylko tego nie zauważamy, no bo jak z a u w a ż y ć coś, czego się nie pamięta?

Druga wiadoma rzecz jest taka, że skuteczność hipnozy w większej mierze zależy od podatności osoby hipnotyzowanej, niż od umiejętności hipnotyzera. Ludzie są podatni na hipnozę w różnym stopniu. Doświadczeni hipnotyzerzy twierdzą co prawda, że są w stanie zahipnotyzować każdego, mnie jednak udawało się tylko z niektórymi. W publicznych seansach estradowych hipnotyzer z dużej liczby chętnych wybiera zawsze tylko małą grupkę. Doświadczenie pozwala mu szybko ocenić, kto spośród kandydatów wydaje się najbardziej podatny. A z niektórymi może być po prostu trudniej.

Podobno najtrudniejsze do zahipnotyzowania są osoby pijane, upośledzeni umysłowo oraz dzieci. Skłonność do hipnozy znana jest zresztą u wielu innych gatunków zwierząt. Nawet kury można zahipnotyzować, trzymając je brzuchami przyciśniętymi do gleby. Po niezbyt długiej chwili kura pogrąża się w zabawnym letargu, a jak się ją puści, to nigdzie nie ucieka. Czyli zupełnie jak nie kura.

Tak czy owak, nie tylko mnie zdarzyła się sytuacja, że ze snu obudził mnie telefon albo pukanie do drzwi, albo jakikolwiek inny dźwięk. Czasami dzieje się to akurat w czasie, gdy coś się śni. Wtedy może się zdarzyć, że taki zewnętrzny dźwięk trafi do środka snu jako jego element. Na przykład, gdy dzwoni prawdziwy telefon, natychmiast zaczyna się śnić dzwoniący telefon, jak gdyby cała ta śniona rzeczywistość chciała asymilować wszystkie sygnały docierające z zewnątrz.

Mniej chwalebny wariant tej historii jest taki, że w trakcie snu czujemy swój napełniony pęcherz i najbezpieczniej byłoby pójść

do łazienki. Tylko że śpimy. I wówczas najgorsze, co może się wydarzyć, to sen, w którym śni nam się, że idziemy do łazienki...

Zewnętrzne czynniki mogą w pewnym stopniu sterować snami. Ale i sny również potrafią sterować naszymi zachowaniami, jak w przykładzie z łazienką, w którym n i e o d p o w i e d n i sen może doprowadzić do poluzowania pęcherza.

Podejrzewam, że hipnoza polega właśnie na kontrolowanym wprowadzaniu delikwenta w stan przypominający sen, ale w taki sposób, by móc tym snem kierować, nie zrywając kontaktu z zasypiającym. Skoro byle dzwoniący telefon posiada moc zmieniania snu, nie powinno być aż takim zaskoczeniem, że wytresowany hipnotyzer może sterować snem w stopniu o wiele bardziej złożonym.

Zapewne samym czytaniem na ten temat szybko bym się znudził, ale miałem sporo szczęścia: pierwsza osoba, na której zrobiłem eksperyment, okazała się w y b i t n i e podatna. Już przy pierwszej próbie bez trudu udało mi się wywołać u niej trans hipnotyczny, a wszystko wydawało się działać dokładnie tak, jak wyczytałem w książkach. Coś pięknego! Spowodowałem też, że po wybudzeniu osoba ta kompletnie niczego nie pamiętała. Szczęka spadła mi do ziemi. Reszty nie trzeba.

Oczywiście z początku podejrzewałem, że jestem po prostu robiony w konia. I włożyłem sporo wysiłku, żeby to wykryć. Ale gdy osoba ta bez wahania przewracała się na ziemię jak kłoda, gdy o to poprosiłem, albo wkładała rękę w płomień świecy i nie było widać, żeby cokolwiek ją bolało, zaczęło do mnie docierać, że to j e d n a k działa. We wszystkich przypadkach musiałem w ostatniej chwili interweniować, żeby zapobiec nazbyt bolesnemu finałowi. Włączanie i wyłączanie bólu albo strachu w trakcie transu

okazało się łatwe. W dodatku wszystko działo się przy otwartych oczach, więc całość robiła naprawdę niezłe wrażenie.

Coś ewidentnie było na rzeczy. Tylko że wśród tych rzeczy było też pełno ewidentnych niedorzeczności. Seanse hipnotyzerów pokazują na przykład, że osobę w transie można poprosić, by wróciła do wspomnień z przeszłości, opowiedziała ze szczegółami, jak wyglądał jakiś konkretny dzień w odległym dzieciństwie. Można poprosić, by ofiara wypadku samochodowego, którego nie pamięta, odnalazła w pamięci numery rejestracyjne samochodu, którym uciekł sprawca. Można poprosić o powrót wspomnieniami do okresu niemowlęcego. Ba, można nawet poprosić o dalszą „regresję" i powrót do poprzedniego życia. Zazwyczaj kończy się to barwną relacją pełną wiarygodnych szczegółów. Tablice rejestracyjne mają właściwy format, opowieści z poprzedniego życia świetnie pasują do znanych faktów historycznych z tamtego okresu. I w ogóle wszystkie powszechnie dostępne informacje są w pełnej zgodzie z przytoczoną relacją. Tylko że całość jest b u j d ą na resorach.

We wszystkie opowieści rzeczywiście wplecione są elementy bazujące na wiedzy osoby hipnotyzowanej, lecz cała reszta to tylko wiarygodnie brzmiący nonsens. Dokładnie tak, jak dzieje się w trakcie snu, gdy nasz mózg na bieżąco z m y ś l a świat, do którego trafiamy. Mózg dba przy tym, żeby świat ten wyglądał wiarygodnie, tkając go z realnych składników, dlatego tak trudno się zorientować.

Relacje osób zahipnotyzowanych brzmią bardzo przekonująco, ale sprawę można dość łatwo obnażyć. Wyjaśniłem na przykład osobie

hipnotyzowanej, czym jest *liczba pierwsza*. A jest to taka liczba naturalna, która dzieli się tylko przez siebie i przez jedynkę. Liczba 2 jest liczbą pierwszą, liczba 3 również, ale 4 już nie, bo 4 dzieli się nie tylko przez 4 i 1, ale także przez 2. Na przykład żadna liczba parzysta większa niż 2 nie może być pierwsza, bo przecież dzieli się przez 2. Gdy upewniłem się, że wszystko jasne, wprowadziłem osobę w hipnozę i poprosiłem o podanie dowolnej pięciocyfrowej liczby pierwszej. Zgodnie z oczekiwaniami, podanie odpowiedzi nie sprawiało większego wysiłku. Kamera stop.

Dla zwykłego śmiertelnika wykonanie zadania jest po prostu niewykonalne. Zresztą niemal równie trudne jest też zweryfikowanie, czy podana pięciocyfrowa liczba jest w rzeczywistości pierwsza czy nie. Można to zrobić dopiero przy użyciu komputera i chwilę to zajmuje. Dla świętego spokoju zadałem sobie trud napisania szybkiej procedury sprawdzającej. Oczywiście, okazało się, że podawane liczby wcale nie były pierwsze. Ani razu. Ale z pozoru tak wyglądały. I w tym leży cały sekret. Osobę zahipnotyzowaną można poprosić, by opuściła swoje ciało i opisała ze szczegółami, co dzieje się w tym momencie w dowolnym innym miejscu na świecie. I otrzymamy wiarygodnie brzmiącą relację. Można również zasięgnąć informacji na temat wyników zbliżającego się losowania totolotka. Naiwni zaś dadzą się nabrać, bo osoba zahipnotyzowana plecie te bzdury ze szczerym przekonaniem. I jest to w hipnozie zabawne, ale nie to jest w niej najbardziej zaskakujące.

Najbardziej zaskakujące i najważniejsze dla historii, którą chcę opowiedzieć, jest to, że wpływ hipnozy n i e kończy się wcale w chwili zakończenia transu hipnotycznego. Od tego momentu najciekawsze dopiero się z a c z y n a.

Otóż okazuje się, że ludzie są bardziej podatni na sugestię, gdy są zrelaksowani. W stanie głębokiego relaksu, który pojawia się w transie hipnotycznym, wpływ sugestii hipnotyzera staje się przeogromny. Standardowa praktyka jest taka, że osobie wybudzanej z transu mówi się, że po otworzeniu oczu ma poczuć się wypoczęta i zrelaksowana. I tak rzeczywiście się dzieje. Można jednak pójść o wiele dalej. Można nakazać osobie hipnotyzowanej, by po przebudzeniu była w stanie wymówić tylko jedno słowo, na przykład słowo „kura". I tak się stanie! W dodatku będzie to zupełnie naturalne i ani trochę nie krępujące. Zjawisko to nazywa się *sugestią posthipnotyczną* i może trwać tak długo, aż pojawi się umówiony wcześniej sygnał, na przykład pstryknięcie palcami.

Jedna z pierwszych sugestii posthipnotycznych, które wypróbowałem, była taka, by po otworzeniu oczu i wymazaniu z pamięci przebiegu całego transu, osoba hipnotyzowana na dźwięk słowa „portfel" stawała na jednej nodze. Byłem bardzo ciekawy efektów tego durnego żartu, więc po wybudzeniu zaczęliśmy swobodną rozmowę, w której wspomniałem coś o portfelu, uważnie przyglądając się reakcji. I rzeczywiście, osoba ta stanęła na moment na jednej nodze! Spytałem o przyczynę takiego zachowania i usłyszałem w odpowiedzi coś w stylu: *tak mi było wygodniej, a czemu pytam?* Wzruszywszy ramionami, kontynuowałem rozmowę, lecz po chwili znów mimochodem wspomniałem coś o portfelu i reakcja znów była taka sama. Ponownie zapytałem o przyczynę i w odpowiedzi usłyszałem, że noga akurat zaczęła swędzieć i wymagała podrapania. Aha. Sytuację jeszcze kilkukrotnie powtórzyłem, dopytując o przyczynę. Odpowiedź za każdym razem brzmiała całkiem wiarygodnie. *Noga mi się zmęczyła.* Rozumiem. *Złapał mnie skurcz.* Jasne. *Ale czemu w ogóle tak się dopytuję?* Hmmm...

Nie chciało mi się wierzyć, że w pełni świadomy, inteligentny człowiek może posłusznie wykonywać jakieś idiotyczne polecenie, nie będąc świadomy, co jest prawdziwą przyczyną! Ale bez najmniejszego problemu będzie podawać wymyślone, lecz wiarygodnie brzmiące uzasadnienie. Za każdym razem! I co najdziwniejsze: będzie w nie szczerze wierzyć, a kwestionowanie takiego wyjaśnienia będzie go tylko irytować. A tymczasem rzeczywista przyczyna takiego zachowania pozostawanie kompletnie nieuświadomiona.

Gdy w końcu się wygadałem: posłuchaj, przed chwilą cię zahipnotyzowałem i wtłoczyłem ci do głowy instrukcję, że masz stawać na jednej nodze, gdy tylko usłyszysz pewne słowo. *Sorry*. Teraz niczego nie pamiętasz, bo kazałem ci o wszystkim zapomnieć. Skoro mi nie wierzysz, zróbmy eksperyment. Ja za chwilę wypowiem to słowo, a ty postaraj się nie podnosić nogi, zgoda? Uwaga... portfel! Noga poszła w górę. Portfel. Noga poszła w górę. Portfel, portfel, portfel. Siła woli nie pomogła, za każdym razem noga bezradnie szła w górę. A na twarzy gromadziła się dezorientacja. Dopiero ponowne wprowadzenie w trans i usunięcie sugestii zakończyło całą komedię. Słowo daję!

Zaczęło mnie wtedy zastanawiać, czy uda mi się wymyślić tak absurdalne instrukcje, że rozsądna skądinąd osoba nie będzie chciała ich wykonać i zracjonalizować. Czy racjonalność będzie w stanie wygrać starcie ze swą żałosną karykaturą – racjonalizacją?

Spróbowałem czegoś takiego: za chwilę trans się zakończy, obudzisz się i o wszystkim zapomnisz. Okaże się jednak, że pokój, w którym jesteś, ma wielką dziurę w ścianie, przez którą widać piękną plażę. Na plaży stoją dwie palmy, pomiędzy którymi rozpostarty jest hamak, na którym śpi David Lynch. Ja natomiast będę mieć dwie głowy, a mój głos będzie dobiegać z lampy.

Okazało się, że zracjonalizowanie tak absurdalnych omamów, które wyraźnie się wytworzyły, nie stanowiło najmniejszej trudności! Dziura w ścianie rzeczywiście była wyraźnie „widoczna", a to z powodu „samochodu, który przecież uderzył wczoraj w dom" (nie wspomniałem, że działo się to na piątym piętrze). David Lynch „odwiedzał akurat okoliczny festiwal filmowy". Ja miałem zaś dwie głowy z powodu „nieudanego przeszczepu operacyjnego, któremu byłem dopiero co poddany". I tak dalej. Nie pamiętam nawet, dlaczego mój głos dochodził z lampy (a tak przecież „rzeczywiście" było), ale wyjaśnienie pojawiło się natychmiast, w dodatku z wyczuwalną pretensją, dlaczego w ogóle pytam o wszystkie te oczywiste oczywistości? Coś pięknego!

Tym razem to ja byłem zbity z tropu. Łatwością, z jaką na pozór rozsądny człowiek potrafi zracjonalizować absolutnie cokolwiek. Jednak najciekawsze spostrzeżenie dotarło do mnie później.

Otóż wszystko to wcale nie działo się wcale przez hipnozę. To nie ona sprawiała te figle. To znaczy, hipnoza rzeczywiście wywołuje u ludzi pewne dziwne zachowania, być może potrafi nieco oszukać niektóre nasze zmysły, ale racjonalizacja, która po niej następuje, towarzyszy nam na co dzień i bez hipnozy. Podejmujemy codzienne decyzje z powodów, których nie rozumiemy, a opancerzeni na rzeczywistość uzasadniamy swoje zachowanie przed sobą i światem w sposób niemający jakiegokolwiek związku z rzeczywistymi motywami. Najczęściej taki charakter mają nasze poglądy polityczne. Hipnoza jest ciekawym narzędziem, by się naocznie przekonać o naszej niebywałej zdolności do racjonalizacji, jednak to nie hipnoza jest tu siłą sprawczą.

Instrukcje do działania w różnych codziennych sytuacjach, które wydaje nam mózg, wydobywają się z czegoś, co nazywa się czasem *podświadomością*, a do czego nie mamy w pełni świadomego

dostępu. Dostęp świadomości jest do niej zablokowany zapewne dla naszego własnego dobra. Podświadomość mogą ukształtować nasi rodzice w dzieciństwie. Może ona ulec modyfikacji pod wpływem silnych bądź traumatycznych przeżyć. Możemy nabawić się na przykład trwałego lęku przed wodą, bo się kiedyś topiliśmy. Będziemy odtąd unikać wody, racjonalizując jednak swój opór wiarygodnie brzmiącymi wymówkami. Jest prawie niemożliwe zmodyfikowanie podświadomości poprzez racjonalną argumentację. W przypadku lęku przed wodą niewiele pomoże argument, że jest płytko albo że tuż obok siedzi ratownik. Podświadomość wydaje się pełnić rolę nadrzędną. Bardziej bezpośredni dostęp do podświadomości z możliwością jej kształtowania można natomiast uzyskać właśnie w wyniku transu hipnotycznego, i na tym polega jego niezwykłość. Czego nie daje się wskórać logicznym wywodem, często można osiągnąć właśnie poprzez hipnozę.

Eksperymenty z hipnozą unaoczniły mi, jak łatwo ulegamy wydzielinie duchowej, którą sami nieustannie sobie sączymy, by stworzyć pozory racjonalności i logicznej spójności naszych irracjonalnych przekonań i czynów. Wydaje nam się, że na co dzień postępujemy całkiem logicznie. Problem z logiką jest jednak taki, że jak ktoś jej nie rozumie, to najczęściej również nie rozumie, że jej nie rozumie.

Racjonalizacja, która usypiając rozum, zastępuje go wiarą, to w istocie narzędzie używane przez mózg, mające wspomóc naszą pewność siebie i przekonanie o słuszności naszych absurdalnych codziennych poczynań. Mechanizm ten jest zresztą zapewne pożyteczny, bo w innym razie zostałby przecież wyeliminowany poprzez procesy ewolucyjne. Niesie on jednak ryzyko efektów ubocznych.

Nie jest mi znany jakikolwiek pogląd, który byłby tak absurdalny, żeby nie miał wśród pogłowia ludzkiego pewnego grona wyznawców. Ludzie potrafią wierzyć we wszystko, nawet w to, że człowiek może żywić się wyłącznie światłem i nie potrzebuje do egzystencji innego pożywienia. Naprawdę, trudno mi wymyślić tak kompletną bzdurę, żeby nie istniał nikt, kto by w nią uwierzył. Nie chcę brzmieć brutalnie. No, może trochę chcę. Więc na otuchę dodam, że głupota to w końcu również pewna metoda używania mózgu.

Wszelka wiara rozsiewa się samoistnie, choć zapewniam, że wyindukowanie w dowolnej głowie jakiegokolwiek absurdalnego wierzenia za pomocą hipnozy również nie stanowi poważniejszego problemu. Wiem, bo próbowałem. Zresztą nie bez powodu większość rytuałów religijnych, ze szczególnym uwzględnieniem tych rozpowszechnionych w najbliższej okolicy, nosi wszelkie znamiona standardowych procedur wprowadzających w trans hipnotyczny. Kluczowym aspektem takich rytuałów jest dbałość o to, by uczestnicy byli przekonani, że żadnego manipulującego podświadomością wpływu w ogóle w tych rytuałach nie ma.

O wszystkim tym piszę, by pokazać, że ludzkie opinie mają dość frywolny związek z rzeczywistością. Fakt, że dwóch inteligentnych osobników może diametralnie różnić się opinią w kwestiach, dajmy na to, światopoglądowych, dostarcza dowodu, że inteligencja nie jest czynnikiem d e c y d u j ą c y m w formowaniu ludzkich poglądów. Inteligencja jest przereklamowana. Gdy dwóch, choćby nie wiem jak bystrych gości kłóci się o jakąś kwestię, to zawartość bzdury w wyrażanych poglądach musi wynosić m i n i m u m pięćdziesiąt procent. Skoro bowiem co najmniej połowa

dyskutujących się myli... a pamiętajmy przecież, że z faktu, że jedna ze stron się myli, nie wynika jeszcze, że druga musi mieć rację!

Wniosek, który na własne potrzeby wyciągnąłem z tych doświadczeń, był taki, żeby ze skrajnym dystansem podchodzić do ludzkich opinii w jakichkolwiek istotnych sprawach. Oceniając, co jest możliwe, a co nie; co jest rzeczywiste, a co nie, nie ma sensu rozczulać się nad tym, co się komu wydaje. Gdyby ludzki „widzimiś" miał decydować o czymkolwiek, to do dziś ani teoria względności, ani mechanika kwantowa, ani teoria ewolucji, ani w zasadzie nic, co wiemy o świecie, nie byłoby traktowane poważnie. Wciąż skakalibyśmy umysłowo po gałęziach. W naszych poglądach niepowstrzymana jest bowiem racjonalizacja, a nie racjonalność. Hipnoza brutalnie to obnaża. Dlatego naukowcy starają się hamować przed n a d m i e r n y m snuciem niesprawdzalnych domysłów, skupiając się na rzeczach, które da się sprawdzić. Są po prostu świadomi swojej nieustannej omylności i tyle. „Szkiełko i oko" jest nie z upodobania, tylko z konieczności.

†††

Jak większość ludzi, byłem przeświadczony o swojej niewielkiej podatności na hipnozę. Próbowałem nawet dać się zahipnotyzować, lecz nic z tego nie wyszło. Przypomniałem sobie wówczas, że poznałem kiedyś kobietę zajmującą się tym zawodowo. Może więc jej by się udało?

Kobietę tę poznałem na samym początku swoich studiów. Przyjechałem wtedy na weekend do Konina i wtedy akurat odwiedzała ona kogoś, kogo znałem. Pani owa na przywitanie pokazała mi pewną sztuczkę. Poprosiła, bym stanął swobodnie, wyciągnęła w moją stronę ręce, a ja poczułem się tym ruchem

„odepchnięty” i musiałem wykonać krok do tyłu, żeby się nie przewrócić. Padło jakieś nonsensowne wyjaśnienie o odpychających się ładunkach elektrycznych. Po czym pani zaproponowała, że pomoże mi pozbyć się „złej energii”. Powstrzymałem sarkazm, nie pytając, ilu konkretnie dżuli owej energii zostanę pozbawiony, wzruszyłem ramionami, zgadzając się z ciekawości, po czym przez kilka minut kobieta kładła ręce na mojej głowie, ale dość szybko zakończyła, mówiąc, że teraz poczuję się już lepiej. Pamiętam jedynie dość dziwne rozkojarzenie pod koniec, ale ogólny efekt był raczej rozczarowujący.

Gdy przypomniałem sobie tę historię, coś mnie tknęło. Zadzwoniłem do osoby, u której cała ta heca się wydarzyła, z pytaniem, czy jeszcze pamięta nasze spotkanie. Sytuacja miała miejsce dobrych parę lat wcześniej, więc podejrzewałem, że ten epizod poszedł w niepamięć. Ku mojemu zdziwieniu, usłyszałem nagłą zmianę tonu w słuchawce i odpowiedź, że owszem, bardzo dobrze pamięta. Uniósłszy brwi, zapytałem: a ile mniej więcej m i n u t to wszystko trwało? Półtorej g od z i n y – usłyszałem w odpowiedzi. Poczułem się wryty w ziemię. Słowo daję, że nic z tego nie pamiętam!

ROZDZIAŁ TRZECI

# *dlaczego kury ruszają głowami?*

W PRZECIWIEŃSTWIE DO RELIGII, która świetnie trafia swoimi tezami w o c z e k i w a n i a wiernych i jest z nimi zadziwiająco zgodna, niemal wszystkim odkryciom naukowym towarzyszyło masowe r o z c z a r o w a n i e. Wspomniane wcześniej odkrycie przez Einsteina teorii względności było kwestionowane chociażby przez słynnych „stu autorów". Później, gdy pojawiła się mechanika kwantowa, połowa jej twórców, o dziwo z samym Einsteinem na czele, również miotała się w konwulsjach, nie chcąc zaakceptować konsekwencji tej teorii i starając się za wszelką cenę podważyć jej logikę. O przewrocie kopernikańskim czy teorii ewolucji nawet nie wspomnę (wspominając niniejszym). Trzeba uczciwie przyznać, że mimo tego, że w wymienionych przypadkach oponenci okazywali się w ostatecznym rozrachunku mylić, to sama ich wątpiąca postawa była w pełni zgodna z duchem nauki. Podejmowali oni bowiem pożyteczny wysiłek obliczony na podważenie jakiejś nowo zaproponowanej koncepcji. Przyjmijmy więc rolę krytyków teorii względności i postarajmy się znaleźć jakieś słabe strony tego, o czym zdążyliśmy się dowiedzieć.

Z równań teorii względności wynika, że ruch jest wspomnianym wcześniej, specyficznym obrotem czasoprzestrzeni. A co za tym idzie, dwa zdarzenia zachodzące równocześnie dla pewnego obserwatora

nie muszą być wcale równoczesne dla innego obserwatora. Co jest w pełni analogiczne do stwierdzenia, że dwa końce kija, które są równo oddalone od jednego obserwatora, nie są wcale równo oddalone od innego, obróconego obserwatora. Mówiliśmy też, że długości ruchomych obiektów i odcinki czasowe mierzone przez poruszające się zegary są krótsze, niż gdyby obiekty i zegary spoczywały. Co jest analogiczne do tego, że fotografując kij pod różnymi kątami, stwierdzimy, że na fotografiach tych będzie mieć różną długość.

Spróbujmy znaleźć lukę w tak zaskakującej konstrukcji. Wyobraźmy sobie człowieka, który z zegarkiem na ręce jedzie sobie autem z Konina do Warszawy. Gdyby nie związane z teorią względności efekty, podróż ta trwałaby, załóżmy, dokładnie dwie godziny. Jednak z punktu widzenia samobójcy leżącego na drodze, zegarek kierującego autem powinien chodzić wolniej w wyniku dylatacji czasu. Czyli po przebyciu całej drogi zegarek na ręce kierowcy powinien wskazać upływ czasu krótszy niż 2 godziny.

Ale przecież, z punktu widzenia tego kierowcy, jego zegarek spoczywa, a rusza się cały świat dookoła. Skoro w tym układzie odniesienia zegar nie podlega dylatacji czasu, to jak ów kierowca miałby wyjaśnić fakt, że dotarł do Warszawy przed upływem dwóch godzin? No i na pierwszy rzut oka mamy paradoks. Czas na drugi rzut oka.

Zwróćmy uwagę, że z punktu widzenia kierowcy pod kołami jego samochodu porusza się droga, a w wyniku tego ruchu ulega ona skróceniu (jak by ktoś pytał, efekt ten nazywa się *skróceniem Lorentza*). Oznacza to, że w układzie odniesienia związanym z jadącym samochodem odległość z Konina do Warszawy staje się po prostu krótsza! W dodatku jest ona krótsza o d o k ł a d n i e

ten sam czynnik, o który wolniej chodził zegarek kierowcy w układzie związanym z leżącym samobójcą.

Jak to się dzieje, że czynniki te są identyczne? Otóż obrót czasoprzestrzeni, z którym mamy tu do czynienia, pochyla zarówno oś czasu, jak i oś przestrzeni, o dokładnie ten sam kąt. Dzięki temu czynniki odpowiadające za dylatację czasu oraz skrócenie Lorentza muszą być identyczne. Czyli droga z Konina do Warszawy, mierzona zegarkiem kierowcy, trwa krócej o tyle samo w każdym układzie odniesienia. Paradoks więc był, ale się zmył.

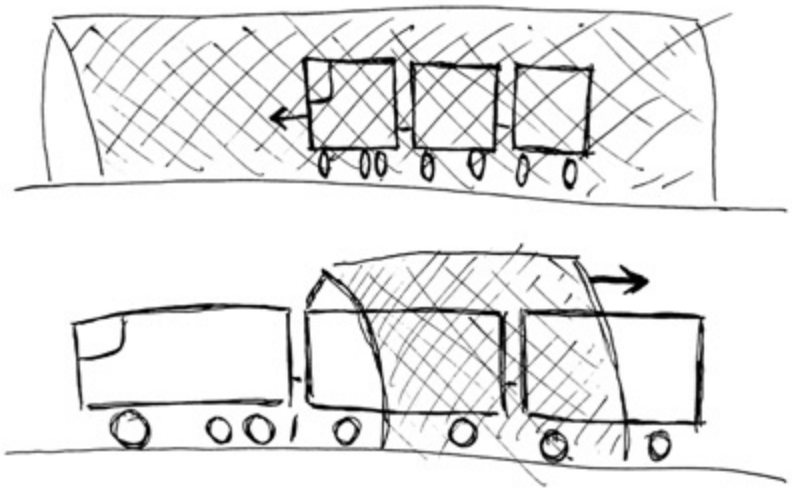
Przykład ten pokazuje dość interesującą własność teorii względności. W układach odniesienia związanych z różnymi obserwatorami (w naszym przykładzie, w układzie samobójcy lub kierowcy), przebieg wydarzeń może być różny. W układzie samobójcy spowalnia czas wskazywany przez zegarek kierowcy, a w układzie kierowcy skraca się droga do przebycia. Jednakże, pomimo tej dychotomii, pewne fakty pozostają niezmienne, to znaczy nie zależą od wyboru obserwatora. Takim obiektywnym zdarzeniem jest fakt, że w trakcie podróży z Konina do Warszawy kierowca i jego zegarek zestarzeli się o mniej niż 2 godziny.

Taka względność opisu przypomina różne sposoby, w jakie możemy patrzeć na codzienne zagadnienia. Polacy szczycili się kiedyś Polską od morza do morza, ale chodziło przecież jedynie o Polskę nadmorską na dwa sposoby. Gdzie chrześcijanin mówi o zmartwychwstaniu, tam wyznawca *voodoo* powie o zjawisku zombie. Oglądamy zaćmienie Słońca, podczas gdy ufoludek z Księżyca widzi zaćmienie Ziemi.

Nie poddawajmy się jednak zbyt szybko i spróbujmy wskazać jakieś inne paradoksalne konsekwencje teorii względności. W Warszawie wybudowano tunel biegnący wzdłuż Wisły. Ale to dopiero początek paradoksu. Wyobraźmy sobie, że bardzo długa

ciężarówka ma akurat taką długość, że gdyby ją w tym tunelu zatrzymać, to ze wszystkimi swoimi przyczepami wypełniłaby idealnie całą długość tunelu. Wyobraźmy sobie następnie, że ciężarówkę tę rozpędziliśmy do tak dużej prędkości, że skrócenie Lorentza staje się znaczące. Wówczas policjant stojący w tunelu stwierdzi ze zdziwieniem, że ciężarówka, mknąc pod ziemią, zajmuje, dajmy na to, jedynie połowę długości tunelu, jak przedstawia to górna część rysunku. Należy nadmienić, że zachowanie kierowcy łamiącego obowiązujące w terenie zabudowanym ograniczenie prędkości surowo potępiamy.

Pozorny paradoks pojawia się wówczas, gdy rozważymy punkt widzenia kierowcy. No bo według niego ciężarówka cały czas przecież spoczywa, a pędzący t u n e l ulega skróceniu, co widać w dolnej części rysunku. No i wedle kierowcy, ciężarówka nie ma szans ani na moment znaleźć się w całości w środku! Przynajmniej połowa musi wystawać. Czy da się pogodzić punkt widzenia kierowcy i policjanta (mimo że w sprawie wysokości mandatu mamy do czynienia z fundamentalną różnicą zdań)?



Owszem. Pozorna sprzeczność wynika z tego, że w problemie pojawia się tylnymi drzwiami pojęcie r ó w n o c z e s n o ś c i. Mówiąc, że w pewnej chwili ciężarówka znajduje się w e w n ą t r z tunelu, mamy na myśli, że według policjanta jej przednia szyba znajduje się w tunelu r ó w n o c z e ś n i e z tyłem ostatniej przyczepy. Tyle to przecież oznacza. No ale chwile, w których policjant mierzył w tunelu położenie przedniej szyby i ostatniej przyczepy, nie są wcale równoczesne według kierowcy. Według tego ostatniego, położenie przedniej szyby zostało przez policjanta zmierzone najpierw, a dopiero chwilę później, gdy tunel zdążył kawałek się przesunąć, zmierzono położenie ostatniej przyczepy. Kierowcy nie dziwi zatem obserwacja wykonana przez policjanta, lecz z jego punktu widzenia pomiary były wykonane w sposób niewłaściwy. I *vice versa*. Sposób, w jaki kierowca mierzy położenie końców tunelu, wydaje się policjantowi błędny. Przykład ten powinien nauczyć nas ostrożnego przyglądania się wszelkim paradoksom teorii względności. Powinniśmy być szczególnie czujni, czy gdzieś nie pojawia się właśnie zdradliwa równoczesność, która jest zależna od wyboru obserwatora.

†††

Jednym z najbardziej znanych „paradoksów" teorii względności jest *paradoks bliźniąt*. Brzmi on następująco. Dwaj bracia bliźniacy, Stacjusz i Rakiet, udali się na stację kosmiczną. Rakiet wsiadł do rakiety i odbył długą podróż, z której po pewnym czasie powrócił do Stacjusza, który cały ten czas przeczekał na stacji. Z punktu widzenia Stacjusza upływ czasu w rakiecie był spowolniony wskutek dylatacji czasu (rakieta cały czas latała ze sporą prędkością). Dlatego Rakiet w trakcie całej podróży

powinien zestarzeć się mniej niż Stacjusz. Ktoś mógłby jednak spostrzec, że z punktu widzenia Rakieta siedzącego w rakiecie, to Stacjusz cały czas się poruszał i to Stacjusz po powrocie powinien być młodszy. Co robić z tą oczywistą sprzecznością?

Otóż, aby ten problem rozwiązać, musimy najpierw omówić jedną z najbardziej fundamentalnych zasad współczesnej fizyki. Zasadę, którą jako pierwszy sformułował Galileusz. Legenda głosi, że podróżując okrętem, był on świadkiem olśniewającego wydarzenia – zaobserwował latającą papugę.

Tego dnia morze było spokojne, a statek płynął szybko i gładko. Papuga towarzysząca Galileuszowi w jego kajucie w pewnym momencie opuściła swą klatkę i zaczęła fruwać po całym pomieszczeniu. Galileusza zszokowało, że papuga lata bez najmniejszego problemu, pomimo dość szybkiego ruchu całego statku. Galileusz, patrząc na sytuację, miał nawet wrażenie, że okręt stoi w miejscu. Trzeba było wyjrzeć za okno, żeby się przekonać, że statek jednak nieźle zasuwa! Stąd właśnie wzięło się przekonanie Galileusza, że ruch statku można odczuć tylko dzięki temu, że woda n i e jest idealnie gładka i okręt odrobinę się kołysze. Gdyby jednak wyobrazić sobie z u p e ł n i e gładką wodę bądź, jak moglibyśmy zrobić to dziś, rakietę podróżującą swobodnie w p u s t e j przestrzeni... W jaki sposób moglibyśmy stwierdzić, że rakieta porusza się, a nie spoczywa, gdyby wszystkie okna były zasłonięte?

Galileusz wyraził przypuszczenie, że nie jest to w o g ó l e możliwe. Czyli, że ruch absolutny, którego konsekwencje można by w jakikolwiek sposób wykryć, nie istnieje. Według niego nie dałoby się odróżnić sytuacji, w której rakieta spoczywa, a ze stałą prędkością porusza się Ziemia, od sytuacji, w której Ziemia spoczywa, a ze stałą prędkością porusza się rakieta. Jest to jedna i ta

sama sytuacja, a ruch ze stałą prędkością jest wyłącznie relacją pomiędzy ciałami, a nie własnością ciała samego w sobie. Zgodnie z zasadą zaobserwowaną przez Galileusza można więc mówić jedynie, że jakieś ciało porusza się ze stałą prędkością w z g l ę d e m pewnego punktu odniesienia, czyli ruch jest zjawiskiem względnym. Mówienie, że coś „się" porusza, jest wyłącznie skrótem myślowym. Galileusz powiedziałby, że nie da „się" poruszać. Można wyłącznie ruszać „się względem" czegoś.

Przypuszczenie to znane jest jako *zasada względności*. Nie da się go, jak żadnego prawa fizyki, w żaden sposób „udowodnić". Natomiast wszystkie wykonane kiedykolwiek eksperymenty są z nim w pełni zgodne. W dodatku kilkaset lat po śmierci Galileusza okazało się, że z jego niepozornej zasady da się wydedukować całą teorię względności ze wszystkimi obrotami czasoprzestrzeni i tym podobnymi dziwactwami.

Galileusz, zafascynowany swą obserwacją, zaczął badać jej konsekwencje. Samotny ogryzek zawieszony w pustej przestrzeni kosmicznej sam z siebie nie zacznie się w żadną stronę poruszać. Chociażby dlatego, że żaden kierunek w pustej przestrzeni nie jest wyróżniony. Obserwując taki ogryzek z lecącej ze stałą prędkością rakiety, stwierdzilibyśmy więc, że jego prędkość nie będzie się zmieniać.

Na tej podstawie Galileusz wyraził przypuszczenie, że swobodne ciało, poruszające się względem jakiegoś ustalonego układu odniesienia, nigdy nie zmieni swojej prędkości, o ile nie zostało poddane działaniu zewnętrznych sił. Następnie Galileusz wpadł na pomysł, w jaki sposób można by tak postawioną hipotezę zweryfikować. W tym celu postawił naprzeciw siebie dwie równie pochyłe o różnych kątach nachylenia i spuszczał z jednej kulkę

w taki sposób, że rozpędziwszy się, wtaczała się na drugą równię. Jak na poniższym rysunku.

Galileusz zauważył interesującą prawidłowość: niezależnie od tego, jakie by nie były kąty nachylenia obu równi, kulka wtaczała się zawsze na niemal tę samą wysokość, z której została upuszczona. A polerując kulki oraz równie i usuwając wszystkie niedoskonałości ruchu, doprowadził do tego, że różnica pomiędzy wysokością początkową i końcową kulki stawała się coraz mniejsza. Galileusz zadał pytanie, co by się stało, gdyby druga równia nachylona była pod b a r d z o niewielkim kątem? Wtedy kulka musiałaby przebyć ogromną drogę, żeby wtoczyć się na początkową wysokość. A w sytuacji granicznej, gdy druga równia byłaby po prostu płaska i i d e a l n i e gładka, przebyta przez kulkę droga musiałaby być... n i e s k o ń c z o n a! A zatem prędkość kulki poruszającej się z pominięciem oporów ruchu musiałaby być s t a ł a po wsze czasy. Tak, jak wynikało to z jego zasady względności.

Teza Galileusza była zaprzeczeniem kultywowanych od ponad tysiąca lat praw sformułowanych przez Arystotelesa. Obrazoburczy pogląd Galileusza z pewnością nie przysporzył mu sympatii ówczesnych dygnitarzy. Zresztą dostojnicy chrześcijańscy wkrótce skazali Galileusza na spalenie żywcem na stosie za głoszenie i popieranie tez stawianych przez Kopernika. Jakieś 25 lat temu jeden z papieży przypomniał sobie o sprawie i uznał za stosowne

przyznać, że skazanie Galileusza na karę śmierci (którą tuż przed egzekucją zamieniono na dożywotni areszt z zakazem prowadzenia badań naukowych) było „subiektywnym błędem". W międzyczasie hipoteza stawiana przez Galileusza stała się fundamentem teorii względności, teorii kwantowej i niemal całej współczesnej fizyki, doprowadzając do stworzenia radia i telewizji. Za pośrednictwem których papież ogłosił swoją łaskę. Warto pamiętać, że *urbi et orbi*, czyli po naszemu „wszem i wobec", możliwe było tylko dzięki osiągnięciom współczesnej techniki, którą po części zawdzięczamy Galileuszowi. Bez niej byłoby to jedynie skromne „do wszystkich zgromadzonych pod balkonem".

Z zasady względności Galileusza wynika, że ruch absolutny jest fikcją. W tym kontekście wprowadza się często pojęcie *inercjalnego układu odniesienia*, to znaczy takiego, który porusza się bez przyspieszeń i w którym nie odczuwa się żadnych przeciążeń. Jeżeli jeden układ jest inercjalny, wówczas każdy inny układ odniesienia, który porusza się względem niego ze stałą prędkością, również jest inercjalny. Tezę Galileusza można by zatem sformułować, mówiąc, że nie ma fizycznego sposobu na o d r ó ż n i e n i e jednego układu inercjalnego od innego. W każdym z nich prawa fizyki są takie same. Dlatego papuga może latać tak samo dobrze w „spoczywającym" układzie, jak i w jakimkolwiek innym inercjalnym układzie odniesienia.

Prowadzi to do różnych zabawnych konsekwencji. Kura, podobnie jak większość ptaków, prawie niczego nie widzi. To znaczy widzi głównie to, co się rusza. A jak coś się nie rusza, to kurze zdaje się, że tego nie ma. To samo jest zresztą z muchami. Dlatego można dotknąć siedzącej muchy, zbliżając do niej palec wystarczająco powoli. Kury znalazły jednak sprytny sposób, by poradzić sobie z dolegliwą budową swoich oczu. Znają one bowiem zasadę

względności Galileusza i wiedzą, że jest bez znaczenia, czy rusza się robak, na którego chcą sobie popatrzeć, czy też względem robaka rusza się ich własna głowa. Ruch jest bowiem wyłącznie względny. Dlatego właśnie kury, gołębie, jak i wiele innych gatunków ptaków machają głowami przy każdym kroku. Dzięki temu cały świat zaczyna się względem nich ruszać i można sobie na niego popatrzeć. Nie żartuję!

Z człowiekiem jest zresztą podobnie, bo nasze oko jest zbudowane na podobnej zasadzie, co oko kurze. Ale aby uniknąć potrzeby machania głową, zostało ono wyposażone w specjalne mięśnie, które wprawiają je w szybkie drgania. Tylko dzięki tym drganiom cokolwiek widzimy. Jeśli ktoś nie wierzy, to może sobie do oka wstrzyknąć specjalny zastrzyk rozkurczający mięśnie i wówczas oko przestanie drgać, a wszystko wokół, co nieruchome, stanie się niewidoczne. Z kompletnej czerni zaczną się wyłaniać tylko te rzeczy, które same się poruszą.

Ruch ze stałą prędkością nie jest więc odczuwalny ani przez papugę, ani przez Galileusza, ani przez nikogo innego. Natomiast w sytuacji gdy w grę wchodzą przyspieszenia, sprawa jest kompletnie inna. Przyspieszenia, nawet gdy są najmniejsze, są bowiem wykrywalne, a w konsekwencji układ obserwatora poruszającego się z przyspieszeniem rządzi się już innymi prawami niż układ inercjalny. Kołysanie statku, drżenie jadącego samochodu to nic innego, jak właśnie niewielkie przyspieszenia, którym poddany jest podróżujący obserwator, a które sprawiają, że jego układ nie jest idealnie inercjalny. I zgodnie z zasadą względności to właśnie ich jesteśmy świadomi w trakcie ruchu, nie zaś samej prędkości.

Z tych powodów w paradoksie bliźniąt, o którym mówiliśmy wcześniej, nie ma wcale sprzeczności. Dylatacja czasu, podobnie

zresztą, jak skrócenie Lorentza, obowiązuje w omówionej formie wyłącznie w układach inercjalnych, a układ Rakieta, który podróżuje rakietą, musi przez jakiś czas przyspieszać, aby rakieta mogła powrócić do stacji kosmicznej. Dlatego nie jest to układ inercjalny, a prawa teorii względności, właśnie ze względu na obecność przeciążeń, stają się w nim inne. Oznacza to, że rację ma Stacjusz, twierdząc, że podróżujący w rakiecie Rakiet okaże się młodszy. Jaka dokładnie powstanie różnica w wieku bliźniaków, zależy od szczegółów trajektorii rakiety, natomiast niezależnie od tego, jaka by owa trajektoria nie była, Stacjusz zawsze zestarzeje się bardziej od swojego brata.

Termin „fizyka teoretyczna", mimo że powszechnie używany, jest wewnętrznie sprzeczny. Fizyka jest bowiem nauką doświadczalną i ostatecznie każda teoria musi być szczegółowo przetestowana eksperymentalnie, zanim ktokolwiek zacznie traktować ją nazbyt poważnie. W 1971 roku wykonany został eksperyment badający, czy efekt zmiany wieku dwóch bliźniaków rzeczywiście ma miejsce. W tym celu przygotowano dwa identyczne, niezwykle precyzyjne zegary atomowe, które zostały dokładnie zsynchronizowane. Następnie jeden z zegarów umieszczono na pokładzie samolotu, który dwukrotnie okrążył Ziemię i powrócił do miejsca startu. Po wylądowaniu wyciągnięto podróżujący zegar i porównano jego wskazania ze wskazaniami bliźniaczego zegara, który przez cały czas pozostawał na Ziemi. Uzyskane wyniki z niebywałą dokładnością potwierdziły wszystkie szczegółowe konsekwencje teorii Einsteina.

Wnioski z teorii względności mogą wydawać się dziwne, ale trzeba przyznać, że teoria ta jest całkowicie spójna logicznie. Jej przewidywania zostały potwierdzone z fenomenalną dokładnością w niezliczonych eksperymentach i nie jest obecnie znane j a k i e k o l w i e k zjawisko, które stałoby z nią w sprzeczności.

Należy się więc pogodzić z tym, że nasz zdrowy rozsądek ma to do siebie, że wiedzie nas na manowce. Tak samo, jak w zagadnieniu kartki złożonej na pół pięćdziesiąt razy. Jeśli zaś czyjaś zdrowa intuicja jest na tyle przytłaczająca, że chce brać górę nad faktami, to należy na serio rozważyć sugestię zaproponowaną przez Richarda Feynmana: *jak ci się nie podoba rzeczywistość, to sobie idź gdzie indziej.*

†††

Siedząc nad jakąś książką w ogrodzie moich rodziców, zauważyłem kolonię mrówek łażących w górę i w dół drzewa. Czytałem akurat, że mrówki mają w zwyczaju chodzić wzdłuż pozostawianych przez siebie śladów zapachowych. Mechanizm był jakoby taki, że mrówka, która natrafiła na jakiś smakołyk, wracała do mrowiska, ciągnąc wzdłuż przebytej trasy niewidoczny dla oka ślad. Inne mrówki, idąc wzdłuż niego, mogły już łatwo trafić do znaleziska. Ślad ten byłby więc stopniowo wzmacniany przez kolejne mrówki, żeby w efekcie wygenerować strumień mrówek sunących wąską ścieżką tam i z powrotem. Uznałem, że przede mną fantastyczna okazja, by sprawdzić, czy ten mechanizm działa naprawdę, czy też jest to bzdura.

Pobiegłem do pokoju i wyciąłem kilka długich pasków papieru, nakleiłem na nie dwustronną taśmę klejącą, po czym przykleiłem je wszystkie pionowo do pnia drzewa, zakrywając fragment trasy przemierzanej przez mrówki. Korciło mnie, żeby sprawdzić, czy mrówki podróżujące wyznaczoną zapachem trasą nie będą chciały wchodzić na papier, bo urwie się tam trop zapachowy. Siadłem więc obok drzewa i gapiłem się zaciekawiony. I rzeczywiście, na dole i na górze pasków szybko utworzyły się korki nabrzmiewające

w miarę upływu czasu. Mrówki zatrzymywały się tam, gdzie kończył się niewidoczny ślad. Co prawda, niektóre właziły na papier, ale zaraz z niego zawracały, sprawiając wrażenie nieco zdezorientowanych. Sytuacja taka trwała dobry kwadrans, dopóki pierwsza mrówka nie przelazła na drugi koniec paska papieru, w czym zresztą gorąco jej kibicowałem. Chwilę później pojawiła się kolejna odważna, aż po dalszych paru minutach normalny ruch został przywrócony i mrówki znów płynnie łaziły w górę i w dół. Tym razem jednak po moich paskach papieru i jeśli naprawdę zostawiały jakiś ślad, to teraz robiły to właśnie tam.

Przystąpiłem do kluczowej fazy eksperymentu. Odkleiłem od drzewa swoje paski i przykleiłem je ponownie, lecz tym razem nie w z d ł u ż drzewa, ale d o o k o ł a...

Jak można się spodziewać, dzięki mojej nieuprzejmości mrówki docierały do papieru, a następnie, zamiast kontynuować ruch wytyczoną pionową trasą, zaczynały kręcić się wokół drzewa. Patrzyłem na to z okrutnym zadowoleniem i pewnie trochę by to jeszcze potrwało, gdyby wtem nie zdarzyło się coś nieoczekiwanego. Wszystkie mrówki nagle zaczęły biec w stronę ziemi. Dosłownie w minutę czy dwie całe drzewo opustoszało. Tym razem ja poczułem się zbity z tropu i w tym stanie przebywałem przez chwilę aż do momentu, gdy na moją głowę nie zaczął padać deszcz.

Metoda poznawania świata poprzez krytyczną obserwację nie jest jednak, broń Boże, jedyna, jaką posługuje się naga małpa. Przez dziesiątki tysięcy lat o wiele bardziej rozpowszechniona była, a w zasadzie wciąż jest, metoda religijna. Polega ona na bezkrytycznym przyjmowaniu prawd objawionych, opisujących bez uzasadnienia, w jaki sposób skonstruowana jest nasza rzeczywistość. Aby dopomóc w ugruntowaniu tej wiary,

przewidziano na przestrzeni dziejów rozbudowany katalog surowych kar za ujawnianie najdrobniejszych wątpliwości. Efektywność takiej właśnie metody jest oczywiście stuprocentowa, a jej działanie błyskawiczne – z marszu podaje się przecież satysfakcjonujący (dla większości wyznawców) opis rzeczywistości. Taki, o jakim wszyscy chcieliby usłyszeć. Niemniej, w odróżnieniu od nauki, która jako efekt uboczny wytworzyła całe dobrodziejstwo współczesnej techniki, głównym owocem drzewa religijnego jest ukojenie ludzkich lęków przed nieznanym. Oraz usatysfakcjonowanie jasno sprecyzowanych człowieczych oczekiwań co do mechanizmów działania świata, sensu istnienia i tym podobnych.

Mogłoby się komuś zdawać, że wiara i unikanie wiary są podejściami logicznie się wykluczającymi. Najlepiej świadczy o tym zresztą fakt, że w wyniku kilkusetletnich tarć pomiędzy religią i nauką, ta pierwsza została wyparta do obszarów, którymi nauka nie zdążyła jeszcze na dobre się zająć. R o z d z i e l e n i e dziedzin jest chyba ostatnim dostępnym sposobem na u n i k n i ę c i e ujawniania oczywistej sprzeczności pomiędzy podejściem wątpiącym nauki oraz podejściem bezkrytycznie wierzącym religii. Co prawda, nauka zakres swych zainteresowań sukcesywnie rozszerza, co wtłacza religię do obszarów coraz ciaśniejszych. Jeszcze kilkaset lat temu religia wyjaśniała pochodzenie gwiazd, genezę Ziemi i okolicznej fauny z florą, dzisiaj zaś obszar jej kompetencji został ograniczony głównie do życia pozagrobowego. Nawiasem mówiąc, określenie „życie pozagrobowe" jest chyba dość niefortunne. W s z y s t k i e znane mi formy życia są pozagrobowe, może z wyjątkiem niektórych form larwalnych.

Niemniej religia broni się przed popadnięciem w sprzeczność z nauką poprzez wycofywanie się do coraz węższych i trudniejszych

do sprawdzenia obszarów. Ale jest to cena nieunikniona w sytuacji, gdy ludzie pielęgnujący swe wierzenia nie kwapią się do rezygnowania z konsumpcji owoców nauki. A nie chcieliby przecież tracić dobrego samopoczucia za sprawą niepotrzebnych oskarżeń o hipokryzję.

Wybitny fizyk i matematyk Pierre de Laplace, zapytany przez cesarza Napoleona, dlaczego w swoim traktacie astronomicznym nie umieścił nawet wzmianki na temat Boga, odparł: *ta hipoteza nie była mi potrzebna, wasza wysokość.* I przez ostatnie dwieście lat niewiele się w tej materii zmieniło.

Mimo tego wszystkiego opinia, że naukę i wiarę, mimo kompletnie sprzecznych założeń, daje się świetnie ze sobą godzić poprzez rozdzielenie ich domen, jest całkiem powszechna. Przypomina mi to o mechanizmie psychologicznym, którego byłem świadkiem, słuchając całkiem rozsądnych uzasadnień dopiero co zahipnotyzowanej osoby, dlaczego mam dwie głowy, a mój głos dochodzi z lampy. A na dźwięk słowa „portfel" nie godzi się stać na dwóch nogach.

# ROZDZIAŁ CZWARTY

## *klatka na ludzi*

CZARNY HUMOR JEST JAK NOGI – nie każdy ma. Natomiast większość posiadająca nogi używa ich nie tylko do chodzenia, lecz także do okazjonalnej jazdy rowerem. Co powinno czynić nas w tej sprawie ekspertami, czyli ludźmi, którzy na dany temat nie muszą myśleć, bo po prostu wiedzą. No to zastanówmy się nad prostym pytaniem: dlaczego człowiek mający do przejścia kilometr czy dwa zmęczy się o wiele bardziej, niż przejeżdżając taki sam dystans rowerem?

Pytanie niby łatwe, ale wcale nie  a ż  takie łatwe, prawda? Pomocny może być następujący eksperyment. Należy wziąć do ręki kawałek kredy i trzymając go tak wysoko, jak się da, przejść wzdłuż ściany, rysując na niej linię. Okaże się, że linia faluje. A różnica w wysokości pomiędzy dołkami a górkami wyniesie pewnie z dziesięć centymetrów. Zgadza się? Jest to dokładnie ta wysokość, na jaką podnosimy środek ciężkości swojego organizmu przy każdym kroku.

Czy te dziesięć centymetrów to dużo czy mało? Wysiłek, który wykonujemy przy każdym kroku, może wydawać się niewielki, ale po przejściu dwóch kilometrów sprawa robi się poważna. W sumie podnosimy nasz ciężar na wysokość dziesięciu centymetrów pomnożonych przez ponad dwa tysiące. No bo tyle przecież zrobiliśmy kroków. Daje to ponad 200 metrów! Czyli po przejściu

dwóch kilometrów wykonaliśmy taką samą pracę, jak przy wejściu pieszo na trzydzieste piętro Pałacu Kultury z workiem cementu na plecach. Po przejściu zaledwie dwóch kilometrów!

No dobra, ale czemu spacer nie wydaje nam się aż tak męczący? Powód jest prosty: praca wykonywana w trakcie spaceru jest zazwyczaj rozłożona w dość długim czasie. Chyba że biegniemy, bo wówczas nie dość, że czas podróży się skraca, to jeszcze wahania środka ciężkości wzrastają. No i zmęczenie się zwiększa.

A jak jest z jazdą rowerem? Otóż jadąc nim po płaskiej, równej drodze, znajdujemy się ciągle na tej samej wysokości. I to właśnie jest powód, dla którego jazda rowerem jest aż taka łatwa: nie ma potrzeby ciągłego podnoszenia się i opuszczania.

W zasadzie można by tu skończyć, ale zostało jeszcze parę pytań. Dlaczego na przykład wejście pod górę jest łatwiejsze pieszo niż na rowerze? Otóż dlatego, że jadąc pod górę, oprócz naszego własnego tonażu, wciągamy jeszcze sam rower, który też swoje waży. No dobrze, a dlaczego w takim razie kolarzom jadącym pod stromą górę zdarza się zeskakiwać z roweru i biegnąc, podprowadzać go, zamiast po prostu jechać, skoro w obu przypadkach do wciągnięcia jest ten sam ciężar? Żeby na to pytanie odpowiedzieć, trzeba by się zastanowić, jak i dlaczego działają rowerowe przerzutki, których w lekkich kolarzówkach się n i e montuje. To zadanie pozostawiam jednak do przemyślenia wszystkim zainteresowanym. Temat dość mocno obfituje w zaskakujące treści.

Działanie roweru jest zresztą niezwykle zagadkowe dla większości użytkowników także pod wieloma innymi względami. Dlaczego rower w ogóle jeździ? Czemu jadący rower się nie przewraca, a stojący owszem?

Z niejasnych powodów sprawa ta budzi liczne kontrowersje. Czasem nawet autorzy podręczników do fizyki wypisują na ten temat kompletne farmazony, powołując się na tak zwany *efekt żyroskopowy*. Aby wyjaśnić, czym jest ten efekt, zwróćmy najpierw uwagę, że im cięższe i bardziej rozpędzone jest jakieś ciało, tym trudniej je wyhamować. To samo z ciałami, które się obracają. Im masywniejsza obręcz i im szybciej się kręci, tym trudniej jest ją zatrzymać lub nawet pochylić płaszczyznę obrotu – a to właśnie jest efekt żyroskopowy.

Jedna z popularnych, lecz błędnych hipotez dotyczących stabilności roweru jest taka, że staje się on stabilniejszy przy większej prędkości, bo koła kręcą się na tyle szybko, że efekt żyroskopowy powstrzymuje rower przed pochylaniem się na boki. Efekt ten rzeczywiście jest istotny w motocyklach posiadających masywne koła. Ale w przypadku roweru, który ma chudziutkie kółka, dużo lżejsze niż cała reszta roweru wraz z rowerzystą, efekt żyroskopowy jest zbyt słaby, żeby całość ustabilizować.

By rozwiać wszelkie wątpliwości, pewien inżynier skonstruował dość osobliwy rower z doczepioną dodatkową parą kół wiszących w powietrzu i kręcących się w przeciwnym kierunku. Dla takiego roweru efekt żyroskopowy zupełnie znikał, natomiast utrzymanie równowagi w czasie jazdy nie stanowiło żadnego problemu. W tej sytuacji niektórzy posunęli się do stwierdzenia, że problem stabilności roweru jest na tyle skomplikowany, że nikt w ogóle nie zna jego rozwiązania! Taki wniosek stanowiłby niezłą kompromitację dla naszego gatunku, zważywszy, że prawie każdy potrafi jeździć rowerem i często to robi.

Na szczęście to tylko gadanie. Mechanizm stabilizacji roweru jest zupełnie banalny. Najłatwiej jest go odkryć, blokując całkiem kierownicę. Rower z zablokowaną kierownicą nie ujedzie zbyt

daleko, bo natychmiast się wywali. A zatem kluczowe dla stabilizacji roweru jest ciągłe skręcanie. Nawet bardzo delikatne. Ślady roweru pozostawione na piasku nie są nigdy proste.

Polecam założyć się z kimś o to, że nie uda mu się ujechać rowerem nawet stu metrów, nie zjeżdżając z prostej linii. Na przykład linii ciągłej namalowanej na środku asfaltowej drogi.

No dobrze, ale d l a c z e g o skręcanie kierownicą pozwala nam utrzymać równowagę na rowerze? Wyobraźmy sobie, że bierzemy kij od szczotki i stawiamy go pionowo na wyciągniętej dłoni. Co trzeba zrobić, żeby kij nie spadł? Wystarczy odpowiednio ruszać ręką! Za każdym razem, gdy kij nieco się wychyli z położenia równowagi, musimy natychmiast przesunąć rękę, aby z powrotem znalazła się pod kijem. Kij pochyli się do przodu – przesuwamy rękę do przodu. Kij pochyli się w prawo – przesuwamy rękę w prawo. I tak dalej. Jeśli będziemy reagować wystarczająco szybko, kij pozostanie w górze, cały czas nad naszą ręką. Dokładnie to samo robi rowerzysta w trakcie jazdy rowerem! Gdy wraz z rowerem pochylą się w prawo, rowerzysta natychmiast skręca kierownicą w prawo, by rower z powrotem pod niego wjechał. Gdy wychylą się z położenia równowagi nieco w lewo – kierownica skręcana jest w lewo. I rower znów wjeżdża pod rowerzystę, przywracając stan równowagi.

Dlatego trudniej jedzie się rowerem bardzo powoli. Przy niewielkiej prędkości rower potrzebuje więcej czasu, by po skręceniu kierownicy wjechać pod rowerzystę. Wtedy może po prostu nie nadążać z wjeżdżaniem i trzeba skręcać coraz mocniej i gwałtowniej. Ot, i cała tajemnica. „Fizyka" stabilności roweru jest banalna.

Można by jeszcze zwrócić uwagę na kilka cech konstrukcyjnych roweru, które ułatwiają płynną, stabilną jazdę. Na przykład

na odpowiednią konstrukcję widelca, na który nadziane jest przednie koło. Odpowiednio wygięty do przodu widelec daje nam to, że rower w zasadzie sam skręca w tę stronę, w którą powinien, nawet bez trzymania kierownicy. Na takim rowerze da się jechać „bez trzymanki". Aby to sprawdzić, wystarczy złapać za siodełko i pochylić w bok. Kierownica sama skręci w tę samą stronę. Rolę rowerowego widelca można też boleśnie zweryfikować, próbując jechać bez trzymanki, ale z kierownicą odwróconą o 180 stopni. Wówczas kierownica zaczyna zachowywać się odwrotnie niż powinna. Kiedy powinna skręcić w lewo – samoczynnie skręca w prawo. Nie polecam.

Rower jest ciekawym urządzeniem. Mamy go podsuniętego pod sam nos (lub co tam jeszcze), używamy na co dzień, a jednak rzadko zastanawiamy się, na jakiej zasadzie w ogóle działa. Dokładnie tak samo jest z rzeczywistością, w której tkwimy. Im bardziej powszechne jest jakieś zjawisko, tym trudniej jest nam zdać sobie sprawę, że jest się w ogóle nad czym zastanawiać. Sytuacja jest na tyle groteskowa, że geniusz najwybitniejszych przedstawicieli naszego gatunku polegał w dużej mierze na umiejętności zadawania pytań o mechanizmy najprostszych i najlepiej nam „znanych" zjawisk. Ponoć Leonardo da Vinci badał ciężar powietrza, jeden z najwybitniejszych matematyków wszech czasów, Carl Gauss, doświadczalnie mierzył sumę kątów w trójkącie, a jeden ze współtwórców współczesnej nauki, Izaak Newton, rozmyślał nad tym, dlaczego ciała spadają. Dla ludzi ówcześnie żyjących, z których większość nieco oszczędniej gospodarowała inteligencją, działania takie musiały być pozbawione sensu. Wiadomo było przecież, że powietrze nie waży nic, suma kątów trójkącie wynosi 180 stopni, a wszystkie ciała spadają, „bo" są ciężkie.

W międzyczasie okazało się jednak, że powietrze zamknięte w dużym pokoju waży kilkaset kilo, w niemal wszystkich trójkątach występujących w przyrodzie suma kątów wcale nie wynosi dokładnie 180 stopni, natomiast siła grawitacji w pewnym sensie w ogóle nie istnieje. To znaczy, niby istnieje, ale ma wszelkie znamiona jedynie *siły pozornej*, czyli takiej, którą odczuwa się na przykład wewnątrz autobusu, który nagle skręca lub hamuje.

†††

Do kwestii tych jeszcze wrócimy, teraz natomiast weźmy na tapetę zagadnienie trójkątów. Kwestia ta nurtowała Gaussa na tyle, że zadał sobie trud wspinania się na górskie szczyty. Jak wiadomo, szczyty są po to, by je zdobywać, jednak błędem himalaistów jest to, że tę piękną metaforę traktują dosłownie. Gauss jednak nie był himalaistą. Chodził po górach nie po to, by „zdobywać szczyty", lecz po to, by przy użyciu urządzeń geodezyjnych mierzyć sumę kątów w gigantycznych trójkątach utworzonych z trzech odległych alpejskich wierzchołków. Istniejące w czasach Gaussa urządzenia pomiarowe nie były wystarczająco precyzyjne, by pozwolić mu wykryć jakiekolwiek odstępstwo od standardowego wyniku szkolnego. Obecnie jednak wiemy, że gdyby tylko Gauss dysponował dokładniejszymi przyrządami, przekonałby się, że suma kątów w trójkącie różni się od 180 stopni. Geometria przestrzeni ulega bowiem zaburzeniu za sprawą grawitacji, która, jak wkrótce się przekonamy, jest o wiele dziwniejsza, niż by można przypuszczać.

Żeby zrozumieć, jak to możliwe, wykonajmy w myślach prosty eksperyment. Wyobraźmy sobie nieruchomą, okrągłą karuzelę – jedną z takich, jakie bywają na wesołych miasteczkach –

z konikami, świnkami i samochodzikami. Gdybyśmy chcieli zmierzyć średnicę karuzeli za pomocą krótkiej linijki, moglibyśmy zrobić to, wielokrotnie przykładając linijkę i licząc, ile razy trzeba odłożyć jej długość, by pokryć całą średnicę. Powiedzmy, że uzyskany wynik to pewna liczba *к*. W podobny sposób moglibyśmy obmierzyć obwód karuzeli, odkładając kolejno linijkę wzdłuż całego okręgu i uzyskując wynik *у*. Ze szkolnej geometrii wiadomo, że stosunek obwodu koła do jego średnicy to liczba π. I tyle właśnie wyniesie stosunek zmierzonych wartości *у/к*. Tymczasem, gdy karuzela będzie się kręcić, a my wraz z nią, wynik ten ulegnie zmianie!

Aby zrozumieć, d l a c z e g o stosunek obwodu koła do jego średnicy w obracającym się układzie odniesienia nie jest równy dokładnie π, musimy przywołać zjawisko skrócenia Lorentza, znane z teorii względności. Przypomnijmy, że polega ono na tym, że poruszające się obiekty stają się k r ó t s z e w kierunku swojego ruchu. Czyli linijka przyłożona wzdłuż obwodu i obracająca się wraz z okrągłą karuzelą stanie się krótsza, a co za tym idzie, trzeba ją będzie przyłożyć w i ę c e j razy, żeby pokryć cały obwód. To zaś zwiększy otrzymaną wartość *у*. Wartość *к* charakteryzująca średnicę nie ulegnie zmianie, bo średnica ustawiona jest prostopadle do prędkości karuzeli i przykładana do niej linijka nie zmieni swojej długości.

Wniosek jest taki, że gdybyśmy mierzyli obwód i średnicę obracającej się karuzeli w związanym z nią obracającym się układzie odniesienia, to stosunek tych dwóch liczb okazałby się w i ę k s z y niż π! A zatem cała szkolna geometria z hukiem by upadła i nawet klasyczny wzór na obwód koła wymagałby korekty. Z podobnymi zjawiskami mamy do czynienia także w innych układach odniesienia, które nie są inercjalne.

Uczona w szkole *geometria euklidesowa* przestaje obowiązywać w sytuacjach, gdy układ odniesienia, w którym się znajdujemy, nie jest inercjalny. Czyli na przykład wtedy, gdy kręcimy się w kółko. W takiej sytuacji ani stosunek obwodu do średnicy okręgu nie musi być równy π, ani suma kątów w trójkącie nie musi wynosić 180 stopni. I tak dalej. W *nieinercjalnych* układach odniesienia działają różne pozorne siły, takie jak siła odśrodkowa, a ich obecność stanowi czytelne ostrzeżenie, że należy spodziewać się zaburzenia klasycznej geometrii.

Podobnie zresztą dzieje się z upływem czasu w układach nieinercjalnych. Zegar umieszczony dalej od osi obrotu karuzeli musi starzeć się wolniej niż zegar znajdujący się bliżej osi, bo porusza się on szybciej względem spoczywającego, inercjalnego obserwatora. Oznacza to, że czas w obracającym się układzie odniesienia spowalnia w miarę oddalania się od osi obrotu. Z tego powodu zegar umieszczony na ziemskim równiku powinien chodzić nieco wolniej niż identyczny zegar umieszczony na którymś z biegunów. No bo Ziemia się przecież obraca! Tego typu galimatias pojawia się w sposób nieuchronny, gdy rozważa się nieinercjalne układy odniesienia. Zresztą wkrótce przekonamy się, że bardzo podobne właściwości ma grawitacja, sprawiając, że czasoprzestrzeń zmienia swoją geometrię, czyli po prostu się zakrzywia. A mówiąc nieco dokładniej, grawitacja po prostu j e s t zakrzywieniem czasoprzestrzeni.

No dobra, ale jakim cudem Gauss nabrał wątpliwości co do zasad geometrii euklidesowej na dobrych kilkadziesiąt lat przed odkryciem teorii względności? Którędy przyszło mu to do głowy? No cóż, był on pod wieloma względami wyjątkowym okazem. Już w podstawówce wsławił się niezwykłymi umiejętnościami matematycznymi. Wieść niesie, że jeden z jego nauczycieli kazał

uczniom zsumować wszystkie liczby od 1 do 40, żeby mieć w czasie lekcji chwilę świętego spokoju. Jednak dziewięcioletni Gauss niemal błyskawicznie podał poprawny wynik: 820, co wszystkich wprawiło w konsternację, tym bardziej, że nikt inny nie był w stanie w ogóle podać dobrego wyniku, nawet po długim czasie. Jak mu się to udało?

Otóż młody Gaussik zwrócił uwagę na fakt, że 1+40 to dokładnie tyle samo, co 2+39, 3+38, 4+37 i tak dalej. Takich par jest 20, więc suma wszystkich liczb od 1 do 40 to po prostu 41 × 20, czyli 820. Czyli niby Gauss był taki bystry, a mierzył sumę kątów w trójkątach, choć każdy głupi wie, że wynosi ona przecież 180 stopni...

†††

Chciałbym podzielić się teraz pewną autorefleksją na temat mojego niestosownego zachowania, którego właśnie się dopuściłem. Przed momentem sparafrazowałem niezwykle doniosły eksperyment myślowy z obracającą się karuzelą, pochodzący z pracy Einsteina z 1915 roku. Pracy będącej efektem dziesięcioletnich rozmyślań, które doprowadziły Einsteina do odkrycia *ogólnej teorii względności*. Czyli ukoronowania jego naukowego żywota. Ów eksperyment myślowy, umieszczony we wstępie do tej pracy, miał za zadanie przekonać fizyków do rewolucyjnej koncepcji, że ruch z przyspieszeniem może zaburzyć znane od tysięcy lat prawa geometrii sformułowane jeszcze przez Euklidesa w starożytnej Grecji. Skąd zatem we mnie aż taka bezczelność, by jakimś szemranym łamańcem łączyć powyższe doniosłe treści ze swoimi niepoważnymi rozważaniami na temat mechaniki roweru?

Rower jest całkiem zabawny. Miałem okazję nieco się nad nim głowić, bo oprócz autostopu stanowił on jedyny środek transportu, na jaki było mnie stać w czasach studenckich. Codziennie pedałowałem do pracy na Wydziale Nauk Przyrodniczych w Amsterdamie, gdzie jako student pracowałem z dwoma kolegami nad kwantową teorią gazu ochłodzonego do jednej milionowej części stopnia powyżej zera absolutnego. Czyli tak zwanego *kondensatu Bosego-Einsteina*, o którym będzie jeszcze mowa.

Żeby wyjaśnić, dlaczego na jednym oddechu piszę poemat dygresyjny o rowerze, kwantowym gazie oraz o teorii względności, pozwolę sobie na nieco dłuższą, osobistą dygresję.

Prawo imigracyjne w Holandii jest bardzo restrykcyjne i nawet niezapłacony przed laty mandat może być źródłem poważnych kłopotów przy przekraczaniu granicy. Jest więc jasne, że pracowałem w Holandii tylko dlatego, że nie zostałem z niej deportowany 5 lat wcześniej, gdy nie miałem jeszcze pojęcia o fizyce. Dlaczegóż to miałbym być deportowany z Holandii? Otóż miało się to wydarzyć na moją własną prośbę.

Jako nastolatek dużo podróżowałem po Europie autostopem. Dzięki temu spotkałem wielu ciekawych ludzi. Nauczyłem się radiowego slangu TIR-owców. Zdarzyło mi się jechać ze złodziejami samochodów konwojem kradzionych samochodów i dowiedziałem się od nich kilku ciekawych szczegółów dotyczących ich rzemiosła. Innym razem załapałem się na stopa rządową lancią prowadzoną przez szefa kancelarii ministra spraw wewnętrznych, który wygadał się w sprawie nie do końca legalnych technik prowadzenia podsłuchów. A jeszcze kiedy indziej jechałem zabytkowym rolls-royce'em, na którego wszyscy się gapili, a właściciel opowiadał mi o tym, jak często wokół niego zdarzają się wypadki.

Czasem z oszczędności nocowałem w podróży, śpiąc pod gołym niebem, a żywiłem się głównie mlekiem z nutellą, które miały najkorzystniejszy stosunek ceny do liczby kalorii. Będąc kiedyś w Holandii, straciłem resztki pieniędzy w trakcie kontroli biletów w jednym z pociągów. Muszę bowiem nadmienić, że jeśli zdarzyło mi się podróżować pociągiem, to robiłem to wyłącznie na gapę, dzięki fałszowanym legitymacjom szkolnym lub dzięki korumpowaniu konduktorów. Zostałem więc bez dachu nad głową, gdzieś nad Morzem Północnym, z niedojedzonym słoikiem nutelli, starym, kradzionym rowerem, który dostałem od kogoś w podzięce za wyświadczoną przysługę, oraz dwudziestoma pięcioma centami w kieszeni.

Żeby jakoś wybrnąć, zrobiłem pierwszą rzecz, która przyszła mi do głowy. Wsiadłem na podrdzewiały rower i pojechałem na najbliższy komisariat policji, gdzie złożyłem szczegółowe i całkowicie zmyślone zeznanie, zgodnie z którym właśnie zostałem okradziony i domagam się deportacji. Wizja ta bardzo mi odpowiadała, bo nigdy wcześniej nie leciałem samolotem, a ktoś właśnie mi powiedział, że deportacja z Holandii odbywa się drogą lotniczą! A w dodatku całkowicie na koszt królowej. Lepszej okazji do przelecenia się samolotem dotąd nie miałem.

Pomimo moich stanowczych nalegań, policjantka wyjaśniła mi jednak, że dopóki nie popełnię jakiegoś przestępstwa, deportacja nie będzie możliwa. Skończyło się więc kolejną włóczęgą na stopa. Plusem tego rozwiązania było jednak to, że pięć lat później mogłem bez problemu zamieszkać w Amsterdamie i zająć się pracą badawczą, a przy okazji drążyć mechanikę roweru.

Głównym celem moich podróży autostopem były konkursy muzyki komputerowej, w których brałem wtedy udział. Mniej więcej od 14. do 17. roku życia zajmowałem się komponowaniem

i było to wówczas moje główne źródło dochodów. Z jednego z takich konkursów w Danii, na który przyjechało kilka tysięcy uczestników, a zatem pula nagród była całkiem okazała, wróciłem ze sporą nagrodą w gotówce. Którą zresztą natychmiast pożyczyłem swojej mamie, która była akurat w potrzebie.

Innym razem wracałem, przegrany i głodny, z Helsinek i dotarłem do Konina chyba tylko dzięki temu, że przez pomyłkę wpuszczono mnie do eleganckiej restauracji na luksusowym promie, którym popłynąłem zupełnym przypadkiem, a na którym do dyspozycji bogatych gości był szwedzki stół...

Środowisko komputerowe wczesnych lat dziewięćdziesiątych, w którym tkwiłem, wywodziło się z grup hackerskich zajmujących się łamaniem i udostępnianiem nielegalnego oprogramowania. Stopniowo zaś wypączkowały z niego także inne nurty twórcze, w które się zanurzyłem. Do dziś jeszcze zdarza mi się dostawać głosy sympatii od osób pamiętających moją ówczesną działalność. Ściany pokoju w Koninie miałem wtedy od podłogi po sufit wytapetowane kopertami po listach. Znaliśmy swoje ksywy, czasem adresy, ale bardzo rzadko nazwiska. Były to czasy, kiedy internet nie był jeszcze aż tak popularny i głównym narzędziem komunikacji był zwykły list, telefon lub podłączony do niego modem. Rozwijaliśmy więc różne kreatywne metody nielegalnego posługiwania się nimi. A to za pośrednictwem kradzionych kont w amerykańskim serwisie AT&T, a to dzwoniąc przez Kielce, dzięki podstawionemu człowiekowi pracującemu w Telekomunikacji Polskiej. Znaczki pocztowe pokrywało się specjalnym zmywalnym klejem, dzięki czemu po zużyciu można było pozbyć się z nich pieczątki i używać ponownie.

Moim ówczesnym wkładem w niszczenie ładu społecznego była autorska metoda kradzieży kart telefonicznych za pomocą gąbki

i kawałka drutu. Nie istniały jeszcze sieci komórkowe i popularne były automaty telefoniczne na specjalną kartę, którą wkładało się do jednego otworu, a po skończonej rozmowie wypadała ona drugim. Wystarczyło tylko gąbką zatkać wylot na karty. Następnie wrócić po godzinie, wydobyć wygiętym drutem gąbkę, a wraz z nią plik kart telefonicznych pozostawionych przez targanych namiętnościami rozlicznych użytkowników, którzy w międzyczasie dzwonili.

Moja metoda rozpowszechniła się na tyle szybko, że po pół roku we wszystkich automatach telefonicznych w Polsce Telekomunikacja musiała wymienić wyloty na karty, zastępując je specjalnymi wąskimi szczelinami. Ze zrozumiałych względów nie będę tego wątku kontynuował. Napiszę tylko, że z tego okresu pozostała mi cenna umiejętność niekonwencjonalnego rozwiązywania nagłych problemów. Na przykład takich, jak nieopatrzne zatrzaśnięcie kluczyka w samochodzie.

Piszę o tym wszystkim dlatego, że mój „lajfstajl" uległ gwałtownej zmianie pod wpływem pewnej obserwacji, która wywarła na mnie ważny wpływ. Jak to się stało, że zamiast zająć się komponowaniem muzyki filmowej, co było moim marzeniem, na rok przed maturą rzuciłem szkołę muzyczną, żeby tylko mieć więcej czasu na znienawidzoną przez wszystkich fizykę, która wciągnęła mnie do tego stopnia, że po pięciu latach dostałem nagrodę Polskiego Towarzystwa Fizycznego za najlepszą pracę magisterską w Polsce, a na egzaminie magisterskim trzy oceny celujące? I jaki ma to związek z połączeniem wątku stabilności roweru z rozważaniami Einsteina, które doprowadziły go do odkrycia ogólnej teorii względności?

Dotychczas usiłowałem pokazać, że fizyka jest ciekawa. No bo rzeczywiście jest, i to szalenie. I to mogłaby być najkrótsza

odpowiedź. Ale to tylko część prawdy. Na dobrą sprawę wszystko jest ciekawe, jeśli spojrzeć pod odpowiednim kątem. Nawet komponowanie muzyki albo myrmekologia, czyli nauka o mrówkach, którą również uwielbiam. Mój osobisty powód do gwałtownej zmiany zainteresowań był jednak inny i po raz kolejny miał związek z psychologią świń.

*Klatka Skinnera* to specjalne urządzenie, za pomocą którego psychologowie behawioralni obserwują zachowania zwierząt w różnych sytuacjach. Czytałem o eksperymentach wykonywanych na świniach, które umieszczone były w jednej z takich klatek. Świnie karmione były za pośrednictwem specjalnego otworu, przez który wpadało do środka jedzenie. Aby jednak jedzenie wpadło, świnia musiała najpierw wcisnąć ryjem przycisk umieszczony po przeciwległej stronie klatki. Wszystko szło gładko, dopóki w eksperymencie uczestniczyła tylko jedna świnka. Wesoło biegała sobie tam i z powrotem, na przemian wciskając przycisk i wcinając paszę spadającą jej „z nieba". Sytuacja uległa istotnej zmianie, gdy w klatce umieszczono dodatkowo drugą, dużo większą i silniejszą świnię.

Początkowo mała świnka wciskała ryjkiem przycisk żywieniowy, ale nagrodę otrzymywała wyłącznie świnia gruba, która była na tyle silna, że nie dopuszczała do paszy swojej małej towarzyszki. Małej śwince taki wysiłek w ogóle się nie opłacał i po krótkim czasie przestała cokolwiek robić, czekając na dalszy rozwój wydarzeń.

Świnia „plus size", jak mówi się obecnie, zmuszona więc została do osobistej przechadzki w stronę przycisku i we własnej osobie (we własnej świni?) wciskała go wielkim ryjem. To jednak otwierało drogę do posiłku małej śwince, która czyhając w pobliżu koryta, mogła co nieco uszczknąć. Duża świnia zaraz co prawda

przybiegała, rozjuszona, i odgoniwszy małą świnkę, dokańczała resztki. Ale co udało się wszamać małej, tego już nikt jej nie odebrał. Tym sposobem duża świnia stała się niejako darmową siłą roboczą, pracującą w pocie świńskiego czoła na posiłek małej, bystrej świnki. Cały eksperyment musiał wyglądać naprawdę zabawnie.

Mnie jednak tknęło w tym opisie coś zupełnie innego. Owe dwie świnie, nawet jeśli bystre i sympatyczne, nie zadawały sobie najmniejszego trudu, by ustalić, skąd właściwie pochodzi dostarczana im pasza. Tak długo, jak były syte i miały zapewnione właściwe warunki do życia, zachowywały się w sposób spokojny i przewidywalny. Zazwyczaj jadły lub spały, czasem wymyślały sobie różne drobne zabawy. Czas jakoś im upływał. Oczywiście oczekiwanie od tych biednych zwierząt czegokolwiek ponad to byłoby zbyt wygórowane, zważywszy, jak niewiele możliwości do działania było im danych. Zwróciłem jednak uwagę, że w zachowaniu l u d z i da się zaobserwować dość zbliżony schemat.

Dokonaliśmy co prawda pewnego ilościowego postępu, organizując sobie w życiu o wiele bardziej wyrafinowane formy rozrywki z kulturą i sztuką na czele. Oddajemy się przeróżnym uciechom ograniczonym tylko wyobraźnią i budżetem. Realizujemy swoje pasje i ambicje. Takie jak bicie rekordu świata w biegu na 200 metrów z przeszkodami albo jeżdżenie snowboardem w japońskim śniegu. Ale większego wysiłku skierowanego na zbadanie klatki, w której sami się przecież także znajdujemy, raczej nie czynimy. Trzeba przyznać, że godność nagiej małpy jest przez to wystawiona na szwank.

Ja przynajmniej doszedłem do wniosku, że stawianie na rozrywkowe i barwne życie pełne atrakcji, które dotąd mi

odpowiadało, nie powinno być absolutnym priorytetem, bo w odpowiedniej perspektywie, na przykład perspektywie eksperymentatora badającego świnie, jest to życie cokolwiek żałosne. Koniec końców, badanie rzeczywistości za pomocą jedynej skutecznej znanej mi metody, jaką jest fizyka, potrafi być nie mniej rozrywkowe i zabawne, ale jest to tylko miła okoliczność, a nie zasadniczy cel.

Co prawda, nie każdemu fizykowi może przypaść w udziale odkrywanie tak zachwycających aspektów rzeczywistości, jak ogólna teoria względności czy mechanika kwantowa, o których będzie ta książka, ale próbować trzeba. Nie ja jestem w końcu odpowiedzialny za swoje przytłaczające ograniczenia umysłowe oraz to, że głównym lokatorem mojego mózgu jest głupota. Mimo wszystko, od czasu do czasu udaje się komuś dostrzec coś ciekawego, czego nie zauważył dotąd nikt inny. Nawet jeśli jest to coś tak błahego, jak mechanizm stabilizujący rower.

†††

Tak więc zacząłem zajmować się fizyką i zastanawianiem nad wszystkim, co mi się napatoczyło. Część tych dociekań doprowadziła mnie do badań, które prowadzę obecnie, a które dotyczą łączenia teorii względności z teorią kwantową. Napiszę o tym później. Ale wiele moich zainteresowań było kompletnie niepoważnych. Zdarzyło mi się na przykład badać siłę nośną muchy. To znaczy sprawdzać, jaki ciężar mucha zdoła unieść w powietrze. Aby go określić, wiązałem musze na jednej z nóżek niewielki supełek z cienkiej nitki, a następnie doczepiałem do nitki kolejne kawałki, sprawdzając, ile z tego mucha udźwignie.

Innym razem badałem, w jakiej kolejności mrówka stawia nogi podczas chodzenia. Koń na przykład chodzi na kilka sposobów, w zależności od swojej prędkości. Idąc powoli, postępuje zgodnie z algorytmem: prawa przednia, lewa tylna, lewa przednia, prawa tylna, i tak dalej... W kłusie i galopie koń wrzuca wyższe biegi i algorytm ulega zmianie. Z mrówkami jest z jednej strony prościej, bo zawsze biegają „na jedno kopyto". Ale za to jest trudniej, bo mają aż sześć nóg, które stawiane są dość szybko. Znalazłem jednak sposób na sprawdzenie, w jakiej kolejności mrówka stawia nogi. Tylko że musiałem najpierw mrówkę nieco spowolnić, ucząc ją pływania. Krótka kąpiel powoduje, że mrówka ledwie dycha i wcale już się jej tak nie spieszy. W tej sytuacji określenie stosowanego przez nią algorytmu chodu nie stanowiło już większego problemu.

Okazało się zresztą, że niektóre mrówki są „prawonożne", chodząc w określony sposób, inne zaś są „lewonożne", chodząc zgodnie z algorytmem będącym lustrzanym odbiciem. Ciekawe, czy ktoś inny kiedyś to badał? Badanie mrówek wydało mi się interesujące dlatego, że większość praw fizyki jest kompletnie taka sama, gdy odniesie się je do obiektów odbitych w lustrze. Nic zatem nie powinno wyróżniać lewej strony od prawej.

Jeśli ktoś nie wierzy, proponuję następujący test. Proszę napisać list do kosmitów, w którym opisana zostanie szczegółowa instrukcja budowy prawego buta. Tak, żeby kosmici na tej podstawie mogli taki but sobie odtworzyć. Nie wolno jednak wykonywać szkiców, wysyłać fizycznych próbek ani odwoływać się do jakichkolwiek struktur przestrzennych, jako referencji. Sam list z suchą informacją, nawet o położeniu wszystkich cząsteczek, z których zbudowany jest but. Najlepiej zakodowany w ciągu zer i jedynek, żeby nie było oszukiwania. Zaręczam, że jakkolwiek byśmy się nie trudzili, wynik

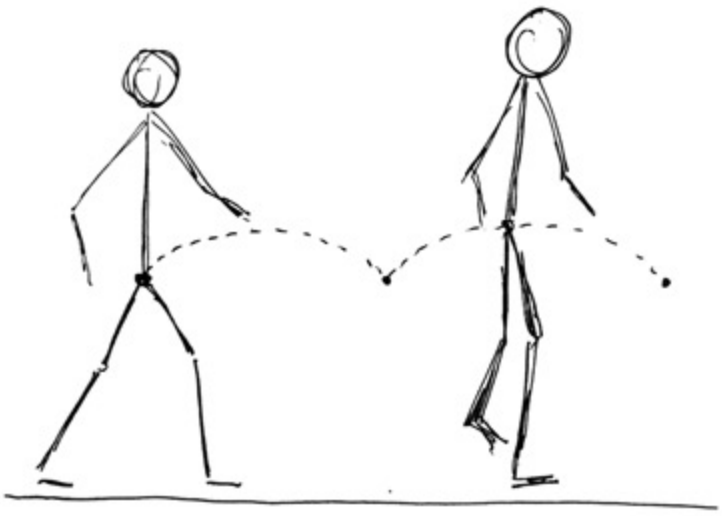
naszego opisu będzie równie dobrze odpowiadać konstrukcji buta prawego, jak i lewego. „Prawość" i „lewość" jest więc bardzo trudno uchwytna. Znany jest tylko jeden zadziwiający proces kwantowy, który takie rozróżnienie może uchwycić i jedynie powołując się w liście na ów proces, moglibyśmy opisać „prawość" buta.

Tym bardziej ciekawe są przyczyny, dla których jakiekolwiek asymetrie lewo-prawo w ogóle pojawiają się w przyrodzie. Kiedy byłem studentem, na ważne kolokwium na Wydziale Fizyki zaproszono biolożkę, która opowiadała o genetyce, a główną tezą jej wystąpienia było to, że informacja o w s z y s t k i c h szczegółach budowy naszych organizmów jest jednoznacznie zakodowana w naszym DNA. Podniosłem rękę i zapytałem, czy znany jest fragment DNA, w którym znajduje się informacja o tym, że nasze serce ma być po lewej stronie? Po sali pełnej fizyków rozszedł się szmer. Fizycy dobrze rozumieją argument z butami i listem do kosmitów. Wynika z niego, że instrukcja o umiejscowieniu naszego serca po lewej stronie n i e m o ż e być jednoznacznie zawarta w samym tylko kodzie genetycznym człowieka. Musi w tej instrukcji pojawiać się jakieś odwołanie do fizycznej struktury jakiejś komórki bądź cząsteczki.

Ciekawe, że białka produkowane przez zwierzęce organizmy posiadają niemal wyłącznie orientację jednego rodzaju – prawostronną. Lewostronna zaś występuje o wiele rzadziej. Nikt nie wie, dlaczego dokładnie tak się dzieje.

Skoro do tak ciekawych pytań doprowadziło mnie badanie, w jakiej kolejności mrówka stawia nogi, to pomyślałem, że nie ma się co przejmować koślawością mojego mózgu. Lepiej po prostu przyglądać się wszystkiemu, co wydaje się ciekawe, a może coś z tego w końcu wyjdzie!

Zastanawiałem się na przykład, dlaczego konie i ludzie przy odpowiednio dużej prędkości nie mogą dłużej iść i zaczynają biec, a mrówki chodzą zawsze na pierwszym biegu. Człowiek w czasie chodu ciągle podnosi i opuszcza swój środek ciężkości – to już wiemy. A ponieważ środek ciężkości przenoszony jest na nieomal prostych nogach, to porusza się on po łukach będących fragmentami okręgów, co pokazuje poniższy rysunek.



No tak, ale jak coś porusza się po okręgu, to zaczyna na to działać siła odśrodkowa, w tym akurat przypadku skierowana w górę. Siła ta wzrasta wraz z prędkością, więc przy pewnej granicznej prędkości musi ona w końcu przewyższyć siłę grawitacji, która ciągnie nas ku Ziemi. A wtedy człowiek po prostu zacznie odrywać się od Ziemi... czyli biec!

Robiąc proste oszacowanie, można dojść do wniosku, że człowiek powinien biec przy prędkości około 7 km/h, co nieźle zgadza się z praktyką. Z tego też powodu chodziarze sportowi, chcąc uniknąć biegu, wykonują śmieszne ruchy biodrami i nogami, ażeby jak najbardziej zminimalizować wahania środka ciężkości generujące

złowrogą dla nich siłę odśrodkową. Problemów tych nie ma mrówka, bo w jej skali graniczna prędkość, przy której musiałaby zacząć biec, okazuje się i tak sporo powyżej jej możliwości.

Wszystkim oprócz Mormonów znane są spektakularne efekty uboczne nauki – takie jak obserwowalny gołym okiem postęp techniczny. Nie wszyscy jednak wiedzą, że starożytni Grecy nie byli w ogóle świadomi zachodzącego postępu – tak bardzo był on powolny. Nie było wtedy nawet odpowiedniego słowa na jego określenie. Natomiast postęp techniczny, który dziś zachodzi przed naszymi nosami, jest tylko drobną konsekwencją niektórych odkryć naukowych dostarczanych przez współczesną fizykę.

Fizycy wysilają się, by rozgryzać mechanizmy, w oparciu o które zbudowana jest nasza własna klatka Skinnera, dla niepoznaki nazywana „rzeczywistością". Czyli po prostu klatka na ludzi. Działania te są jedynym skutecznym sposobem prowadzenia nierównej walki o godność nagiej małpy. Że się tak, nieco z przymrużeniem oka, wyrażę. Większość ludzi bardziej ujmuje co prawda religia, która według mnie tylko tę godność odbiera (bo jak słusznie powiedział antropolog Ludwig Feuerbach, *każdy dogmat to nic innego jak zakaz myślenia)* bądź filozofia. Jednak, o ile w pracy fizyka teoretyka potrzebny jest długopis, papier i kosz na śmieci, to w przypadku filozofów ten ostatni okazuje się całkiem zbędny.

Czy moje okrężne argumenty trafią do kogokolwiek – niestety nie wiem. A jeśli nie, to niechaj diabeł poniesie mnie na oklep w otchłań hańby.

# ROZDZIAŁ PIĄTY

## *horyzont zdarzeń*

POD KONIEC POPRZEDNIEGO ROZDZIAŁU napisałem o filozofach jeszcze kilka „ciepłych" słów. Jednak mój Wydawca kazał mi je bezwzględnie usunąć. W atmosferze zastraszenia zmieniam więc temat.

Przerażające, tajemnicze, osobliwe kosmiczne twory. Ich odkrywcą był wybitny fizyk, a także porucznik niemieckiej artylerii – Karl Schwarzschild, który przewidział ich istnienie, walcząc w okopach pierwszej wojny światowej. Wojna, jak pisał w liście do Einsteina, obeszła się z nim łaskawie. Rzeczywiście, Schwarzschildowi udało się ujść z niej z życiem. Wkrótce potem zmarł na rzadką chorobę genetyczną. Ale tuż przed śmiercią zdążył opublikować swoje pionierskie wyniki.

Mowa o odkrytych przez Schwarzschilda *czarnych dziurach*, czyli obiektach przewidywanych przez równania ogólnej teorii względności, lecz na tyle zagadkowych, że sam Einstein wątpił w możliwość ich istnienia. To akurat nie powinno zupełnie nas zniechęcać, bo Einstein, pomimo swej genialności, wątpił również w możliwość uzyskania energii nuklearnej (na trzy lata przed wywołaniem pierwszej *reakcji łańcuchowej*), wątpił w istnienie fal grawitacyjnych (odkrytych w 2015 roku), a także do śmierci podważał sens mechaniki kwantowej (która okazała się najprecyzyjniejszym opisem rzeczywistości, jakim kiedykolwiek

dysponowała ludzkość). No, ale nie ma się co dziwić jego wątpliwościom, skoro zgodnie z jego własną teorią względności wokół czarnych dziur dzieją się niewiarygodne rzeczy. Czas w ich okolicy kompletnie się zatrzymuje, każdy, kto przekroczy magiczną granicę *horyzontu zdarzeń*, nigdy nie zdoła już powrócić na zewnątrz, a w paszczy czarnej dziury, w samym jej środku, zwanym *osobliwością*, czas i przestrzeń kompletnie się załamują. Podobnie jak wszystkie znane nam prawa fizyki. No cóż, rzeczywistość jest dziwna. Swoją drogą, źródłem zaobserwowanych po raz pierwszy fal grawitacyjnych była właśnie para zderzających się czarnych dziur. Einstein zaś powątpiewał w istnienie i jednych, i drugich, choć są one konsekwencjami jego własnej teorii.

Na temat czarnych dziur istnieją zasadniczo dwa typy opracowań. Pierwszy to opasłe tomiska ociekające matematyką i zaawansowanym fachowym żargonem, niemożliwym do sforsowania przez osobę bez długoletniego przygotowania. Tą drogą iść nie zamierzamy. Drugi typ to barwne opowieści napisane bajkowym, pachnącym językiem, zmuszającym jednak do przyjmowania wszystkich faktów na wiarę. Chłonąc taki tekst, czytelnik ma zajęcie, a jego mózg odpoczynek. Tego również wolałbym uniknąć.

Wyznaję zasadę, że czego nie umiałbym wytłumaczyć własnej babci, tego po prostu nie rozumiem. Na szczęście zagadnienie czarnych dziur jest o wiele prostsze, niż powszechnie się sądzi. Wszystkie najważniejsze fakty na ich temat da się pokazać jako logiczne wnioski wypływające z elementarnych rozważań i nie ma konieczności odwoływania się do fachowego przybornika matematycznego. Dlatego na temat czarnych dziur mam zamiar pisać i do r z e c z y, i do l u d z i. Potrzebna będzie tylko odrobina skupienia i pomyślunku.

Czarne dziury to obiekty o bardzo prostej strukturze. To najzwyklejsza w świecie materia ściśnięta do niezwykle małych rozmiarów. Gdyby ścisnąć Ziemię do rozmiarów orzecha – powstanie czarna dziura. Z człowieka też można by zrobić czarną dziurę, lecz trzeba by go w całości ścisnąć do rozmiarów dziesięć miliardów razy mniejszych niż pojedynczy proton. To zaś nie jest łatwe, a i człowiek by protestował.

Nie ma znaczenia, z jakiego dokładnie budulca powstaje czarna dziura, dlatego że jej materia i tak błyskawicznie zapadnie się pod wpływem własnej grawitacji do centralnego p u n k t u zwanego *osobliwością,* niszcząc przy tym całą swoją fizyczną strukturę. Z tego powodu czarna dziura, która powstała z zapadniętej gwiazdy zbudowanej z żółtego sera, będzie identyczna, jak czarna dziura powstała z zapadniętej gwiazdy zbudowanej z ogórków kiszonych o tej samej masie. Przedziwne własności czarnych dziur nie wynikają więc z egzotycznego charakteru materii, z której są zbudowane. Materia ta jest zupełnie zwykła. Cała magia kryje się w niewiarygodnej naturze samej grawitacji, której źródłem jest materia. Mogłoby się wydawać, że pospolita siła grawitacji, ciągnąca nas na co dzień ku glebie, niczym szczególnym już nas nie zaskoczy. A tu proszę!

Cóż tak dziwnego tkwi w sile powszechnego ciążenia? Wyobraźmy sobie, że znaleźliśmy się w zamkniętym pokoju, który na ścianie ma tajemniczy przełącznik. Przełącznik, za pomocą którego możemy włączać i wyłączać panującą wewnątrz g r a w i t a c j ę. Przełączając pstryczek, możemy więc zafundować sobie stan nieważkości. Będąc w tym stanie, zawieśmy w różnych miejscach pomieszczenia następujący zbiór lewitujących przedmiotów: długopis, ptasie piórko, krzesło, pojedynczy elektron, balonik wypełniony lekkim gazem, zamyślonego filozofa, kulkę

z antymaterii i cokolwiek, co jeszcze przyjdzie nam do głowy tam umieścić. Następnie przełączmy pstryczek na ścianie, włączając grawitację. Nagle wszystkie wiszące początkowo ciała zaczną przyspieszać. Jeśli pokój wypełniony był powietrzem, każde ciało, na skutek tarcia, będzie spadać z nieco innym przyspieszeniem, jedynie balonik poleci w górę. Dlaczego w górę? Dlatego, że po włączeniu grawitacji nawet samo powietrze, będące wcześniej w stanie nieważkości, również zacznie spadać, wypierając lżejszy balonik.

Jeśli jednak w pokoju nie było powietrza, a zatem w trakcie spadku nie występowało tarcie (ze względów humanitarnych filozof został wcześniej zaopatrzony w maskę tlenową) – wszystkie ciała zaczną spadać w kierunku podłogi z i d e n t y c z n y m przyspieszeniem, aż wreszcie o nią walną. Na tym właśnie polega powszechność siły ciążenia. Podlegają jej w jednakowy sposób w s z y s t k i e występujące w przyrodzie ciała. Gdyby udało się znaleźć choćby jedno ciało spadające nawet z minimalnie odmiennym od reszty przyspieszeniem, powszechność grawitacji zostałaby podważona. Fakt ten zauważył po raz pierwszy Galileusz. Ten sam od papugi na statku.

Dlaczego powszechność grawitacji ma aż taką, *nomen omen*, wagę? Otóż dlatego, że istnieje i n n y od grawitacji sposób mogący sprawić, by w s z y s t k i e ciała, wiszące początkowo w nieważkości, zaczęły nagle spadać w jednakowy sposób. Cóż to takiego? Tym alternatywnym sposobem jest... przyspieszenie w górę całego pokoju.

No oczywiście! Wyobraźmy sobie, że nasz pstryczek na ścianie uruchamia nie grawitację, lecz silniki rakietowe umieszczone pod podłogą, powodujące, że cały pokój zacznie przyspieszać w górę. Wówczas, po włączeniu silników, podłoga zacznie zbliżać się

do wszystkich wiszących w nieważkości ciał z jednakowym przyspieszeniem. Z dokładnie takim, z jakim rozpędza się cały nasz pokój! Dla kogoś stojącego na podłodze sytuacja ta będzie wyglądać dokładnie tak, jakby wszystkie ciała zaczęły spadać w jednakowy sposób.

Z faktu tego zdał sobie sprawę ponad 100 lat temu Albert Einstein i uznał to spostrzeżenie za najszczęśliwszą myśl całego swojego życia. Zauważył on, że wpływ grawitacji na cokolwiek, co znajduje się wewnątrz pokoju, jest nieodróżnialny od wpływu przyspieszenia całego pokoju. Ponadto każde niewielkie ciało w trakcie swobodnego spadania w polu grawitacyjnym „czuje się" dokładnie tak, jak by po prostu lewitowało. Tym bardziej że wszystkie inne przedmioty wokół niego spadają z identycznym przyspieszeniem!

Za chwilę dotrze do nas to, co zrozumiał Einstein, a co sprawia, że podobieństwo pomiędzy grawitacją i przyspieszaniem całego układu odniesienia, którym jest rozważany pokój, ma aż tak wielkie znaczenie. Otóż o efektach ruchu wiemy już całkiem sporo. Ruch ze stałą prędkością wywołuje na przykład spowolnienie (dylatację) czasu bądź skrócenie (Lorentza) poruszających się ciał, związane z obrotem czasoprzestrzeni. Natomiast ruch o b r o t o w y może zaburzyć geometrię przestrzeni i czasu. Jak pamiętamy, nawet wzór na obwód koła ulega z m i a n i e, gdy w naszym układzie odniesienia występują pozorne siły.

Einstein, który chciał zrozumieć działanie grawitacji, pojął, że zamiast kopać się z koniem, można zastąpić w rozważaniach wpływ grawitacji wpływem najzwyklejszego ruchu z przyspieszeniem. A jego konsekwencje, takie jak odstępstwa od praw geometrii euklidesowej, są nam już znane. Einstein miał niezłego nosa, przyjmując dość nieoczywistą hipotezę, że siedząc

w rozważanym przez nas zamkniętym pokoju, nie da się stwierdzić, czy pstryczek na ścianie włącza silniki rakietowe w podłodze, czy też włącza grawitację! A to znaczy, że można dowiedzieć się jak działa grawitacja wytwarzana przez czarną dziurę poprzez badanie konsekwencji najzwyklejszego przyspieszenia!

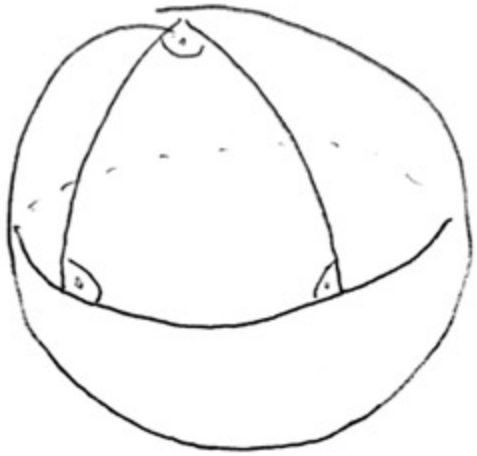
Hipotezę tę nazwano *zasadą równoważności.* Na niej właśnie bazuje cała ogólna teoria względności. Jest zatem jasne, że odkrycie choćby jednego egzotycznego obiektu, na przykład nieznanej cząstki elementarnej, która podlegałaby grawitacji w nieco inny sposób niż reszta świata – zniweczyłoby całą teorię. Nic dziwnego, że fizycy lubujący się w podważaniu wszystkiego i wątpieniu, w co tylko można, od stu lat zajadle poszukują takich obiektów. Póki co, bez skutku.

†††

Jeśli zasada równoważności jest prawdziwa, oznacza to wiele niezwykłych rzeczy. Przede wszystkim należy się spodziewać, że pole grawitacyjne będzie wywoływać najróżniejsze zaburzenia geometrii euklidesowej w podobny sposób, jak działo się w przykładzie z obracającą się karuzelą. Zaburzeń tych bezskutecznie poszukiwał Carl Gauss za pomocą swoich nie dość precyzyjnych urządzeń geodezyjnych. Należy się spodziewać, że grawitacja będzie mogła zmieniać upływ czasu, a nawet modyfikować wzór na obwód koła! Stara, poczciwa grawitacja, kto by się po niej spodziewał takich numerów?

W sytuacji takiej mówi się często o *zakrzywieniu czasoprzestrzeni.* Dlaczego? Wyobraźmy sobie globus, na którym zaznaczymy flamastrem dwa południki i fragment równika. Wybierzmy południki w taki sposób, żeby na biegunie północnym przecinały

się pod kątem prostym. Każdy z tych południków przecina równik także pod kątem prostym, jak przedstawia to rysunek.



A ile wyniesie suma kątów w takim trójkącie? Hmm... 3 × 90 stopni, czyli 270 stopni! Więc co ze szkolną regułą, która mówi, że suma kątów musi z a w s z e wynosić dokładnie 180 stopni? Otóż wcale nie zawsze, a jedynie wtedy, gdy powierzchnia, na której jest narysowany trójkąt, jest p ł a s k a. Co prawda pytanie, czy Ziemia jest płaska, wciąż w pewnych kręgach pozostaje kwestią otwartą. Ale jeśli wysunąć odważną tezę, że Ziemia ma kształt kuli, to ze względu na krzywiznę powierzchni prawa szkolnej geometrii ulegną na niej zmianie. I dlatego właśnie sytuację, gdy w czasoprzestrzeni suma kątów w trójkącie różni się od 180 stopni, łączymy zazwyczaj (choć nie zawsze) z jej „zakrzywieniem".

Zasada równoważności rodzi jednak także inne, zaskakujące przewidywania. Wyobraźmy sobie, że chwilę przed pstryknięciem przełącznika na ścianie wystrzeliliśmy wewnątrz pokoju impuls ś w i a t ł a lecącego poziomo. Co stanie się z lecącym w bok światłem, gdy cały pokój zacznie nagle p r z y s p i e s z a ć w górę? Należy oczekiwać, że startująca pionowo podłoga zacznie

z b l i ż a ć się do podróżującej poziomo wiązki światła. A jak ta sytuacja będzie wyglądać z punktu widzenia kogoś stojącego na podłodze? Według niego, impuls światła wystrzelony poziomo będzie stopniowo zbliżać się do podłogi, czyli jego trajektoria będzie się zaginać w dół. Zupełnie jak gdyby światło było... ciężkie!

Z zasady równoważności Einsteina wynika, że dokładnie to samo powinno się wydarzyć, gdy w pokoju zostanie włączone pole grawitacyjne. Również i w tej sytuacji lecący poziomo impuls światła powinien zacząć zaginać swój tor w stronę podłogi, czyli... po prostu opadać! Więc nawet światło musiałoby spadać pod wpływem grawitacji!

Nic dziwnego, że zaraz po opublikowaniu pracy Einsteina fizycy doświadczalni starali się wykryć tego typu efekt jak na złamanie karku. Gdyby okazało się, że światło wcale nie spada w polu grawitacyjnym, byłby to szybki koniec pięknej idei. Dlatego właśnie podstawowym narzędziem fizyków teoretyków jest k o s z n a ś m i e c i.

A jednak spadanie światła w polu grawitacyjnym udało się wykryć! Przy najbliższej okazji, gdy doszło do zaćmienia Słońca, zaobserwowano światło odległych gwiazd, znajdujących się w tym czasie z tyłu Słońca. Było to możliwe tylko dzięki temu, że światło tych gwiazd z a g i ę ł o się, przechodząc w pobliżu Słońca.

Tymczasem dziś wiemy już z niezliczonych eksperymentów, że światło rzeczywiście spada w polu grawitacyjnym dokładnie tak, jak żąda tego zasada równoważności. W dodatku spada z tym samym przyspieszeniem, co wszystkie inne ciała. W przypadku grawitacji ziemskiej jest to tak zwane przyspieszenie *g*. Nie zauważamy tego spadania na co dzień tylko dlatego, że światło porusza się tak szybko od źródła do oka, że nie zdąży w tym

krótkim czasie opaść prawie wcale. Efekt ten ujawniają jednak precyzyjne pomiary.

My tymczasem jesteśmy na dobrej drodze do zrozumienia, czym są czarne dziury.

†††

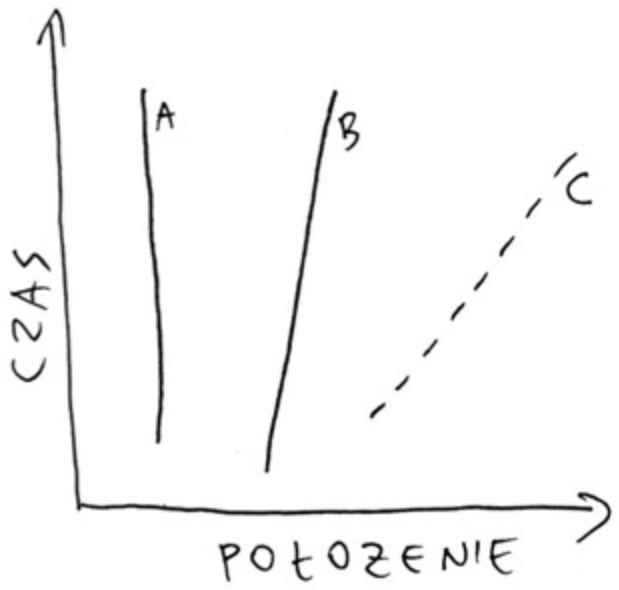
Brakuje nam w zasadzie jeszcze tylko jednego, ważnego składnika. Jest nim fakt, że żadnego ciała posiadającego masę nie da się rozpędzić do prędkości światła. Powód jest prozaiczny: energia, która byłaby do tego niezbędna, jest po prostu nieskończona. Możemy rozpędzić ciała do prędkości dowolnie bliskiej prędkości światła. Ale sama magiczna granica jest nieosiągalna. Eksperymenty z rozpędzaniem pojedynczych cząstek wykonuje się w specjalnie do tego zaprojektowanych ogromnych urządzeniach, zwanych *akceleratorami cząstek*. Największy z nich, w laboratorium CERN w okolicach Genewy, to zakopany pod ziemią pierścień o średnicy kilku kilometrów. Wewnątrz niego rozpędza się pojedyncze cząstki, nadając im prędkość równą 99,9999991% prędkości światła. Osiągnięcie dokładnie prędkości światła wymagałoby jednak nieskończonej energii i dlatego nie wydaje się możliwe.

Oznacza to, że rakieta z włączonymi stale silnikami będzie się, co prawda, coraz bardziej rozpędzać, zbliżając się do prędkości światła. Ale samej tej granicznej prędkości nie zdoła nigdy osiągnąć. Nawet gdyby paliwa było pod dostatkiem.

Dżentelmen to taki mężczyzna, który potrafi opisać piękną kobietę bez używania rąk. Ale mówiąc na temat ruchu, mimo wszystko wygodnie jest posługiwać się prostymi rysunkami.

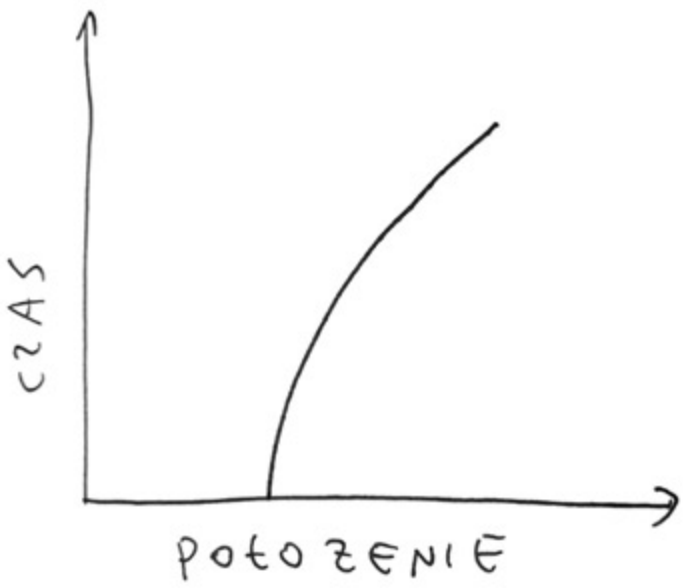
Spójrzmy na poniższy wykres. Przedstawia on zależność położenia jakiegoś ciała od upływającego czasu.

Jeśli mamy do czynienia z pionową linią prostą (zaznaczoną literą *A*), opisywane nią ciało po prostu spoczywa, bo jego położenie nie zmienia się w czasie.

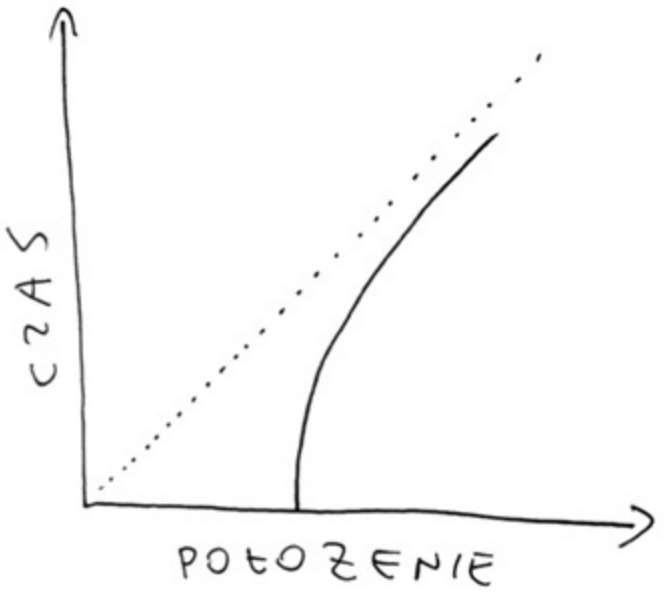



Jeśli linia jest nieco pochylona (zaznaczona jest ona literą *B*) – rozważane ciało porusza się z pewną prędkością, bo, jak widzimy z wykresu, położenie zmienia się w czasie. Im bardziej pochylona jest linia, tym szybszy jest opisywany przez nią ruch. Światło, które porusza się, jak sama nazwa wskazuje, z prędkością światła, będziemy zaznaczać przerywanymi liniami nachylonymi pod kątem 45 stopni (litera *C*). Wybór tego kąta jest kwestią pewnej konwencji i mógłby być jakikolwiek inny. My jednak przyjmiemy dla wygody rysowania, że jest to akurat tyle. A zatem nachylenie wykresu opisującego ruch jakiejkolwiek rakiety nie może osiągnąć, ani tym bardziej przekroczyć, nachylenia 45 stopni.

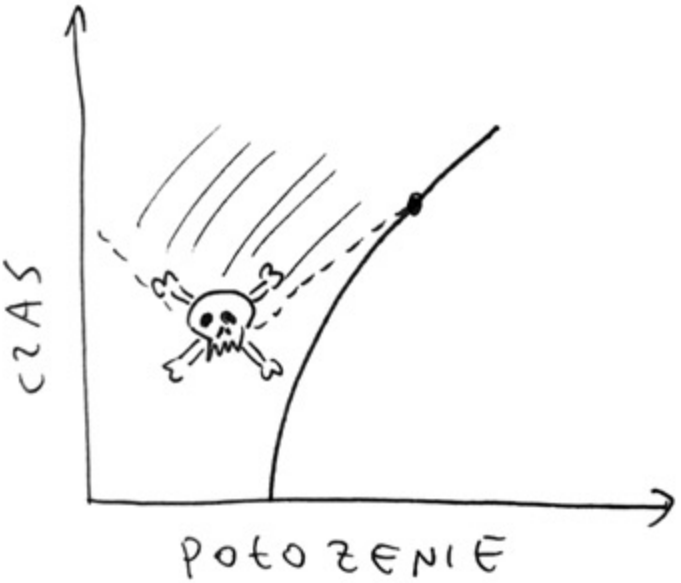
Jeśli wsiądziemy do rakiety, uruchomimy silniki o stałej mocy, które nadadzą nam stałe przeciążenie (czyli pozorną siłę wbijającą nas w fotel) i będziemy coraz bardziej się rozpędzać, nasza trajektoria będzie nachylać się coraz bardziej, przyjmując kształt mniej więcej taki, jak przedstawia to linia na kolejnym rysunku. Linia ta nigdy jednak nie osiągnie nachylenia równego dokładnie 45 stopni.




Można wręcz wyobrazić sobie pewną hipotetyczną trajektorię, zaznaczoną kropkowaną linią na następnym rysunku, do której przyspieszająca rakieta będzie się stopniowo zbliżać, nigdy jednak jej nie osiągając. Ta kropkowana trajektoria, podobnie jak trajektoria światła, jest także nachylona pod kątem 45 stopni. Oznacza to tyle, że przyspieszająca rakieta nigdy nie zdoła rozpędzić się dokładnie do prędkości światła, będzie jedynie do tej prędkości się zbliżać.

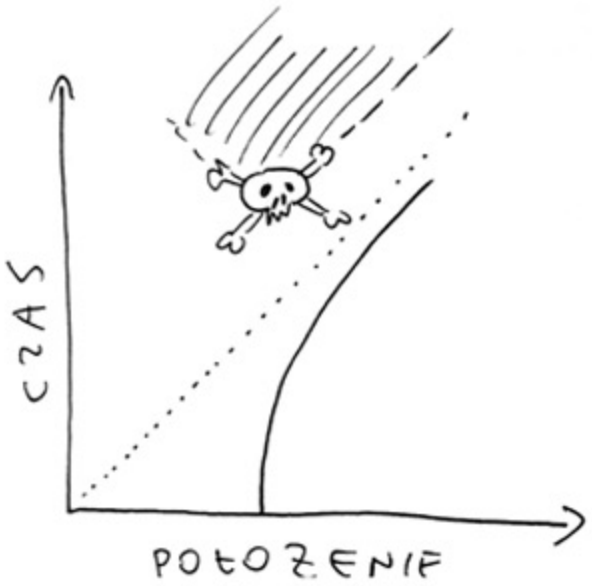



Jeśli na zewnątrz rakiety, w pobliżu miejsca, z którego wystartowała, po pewnym czasie wybuchnie straszliwa bomba atomowa, powstały przy tym strumień energii, światła i materii dotrze do podróżujących astronautów z opóźnieniem. Obszar, do którego dociera informacja o wybuchającej bombie, został zaznaczony ukośnymi kreskami.



Dlaczego informacja o wybuchu może znaleźć się tylko w zakreskowanym obszarze? Dlatego, że informacja rozprzestrzenia się z prędkością mniejszą niż światło. Czyli nie może ona przekroczyć przerywanych linii wychodzących z czaszki, wzdłuż których porusza się światło wybuchu.

A teraz zwróćmy uwagę na coś głęboko zaskakującego. Jeśli do wybuchu bomby dojdzie jeszcze później, w punkcie zaznaczonym czaszką na kolejnym rysunku, podróżujący rakietą w ogóle nie dowiedzą się o wybuchu. Nigdy. Bo obszar, do którego informacja o wybuchu bomby może dotrzeć, zaznaczony ukośnymi kreskami, nie jest nigdzie przecinany przez trajektorię rakiety. Do rakiety nie dotrze nawet światło wybuchu, mimo że bomba wybuchła w tym samym miejscu, z którego wystartowała rakieta! W dodatku przyspieszenie rakiety wcale nie musi być ogromne, może to być nawet ziemskie przyspieszenie $g$.




Podałem dość spektakularny przykład wybuchającej bomby atomowej, żeby pokazać, że nawet tak dramatyczne wydarzenie nie

pozostawi najmniejszego śladu na przyspieszającej rakiecie. Pasażerowie w ogóle o takim wybuchu nawet się nie dowiedzą. Zresztą cokolwiek, co zaszłoby powyżej kropkowanej linii, pozostanie na zawsze tajemnicą dla przyspieszających w rakiecie obserwatorów.

Z tego powodu owa kropkowana linia, do której zbliża się trajektoria rakiety, odgrywa szczególną rolę i nazywana jest *horyzontem zdarzeń.* Horyzont zdarzeń ukrywa przed pasażerami rakiety fragment rzeczywistości znajdujący się po drugiej stronie. Niczego, co tam zachodzi, pasażerowie nieustannie przyspieszającej rakiety nigdy nie zobaczą ani nie poznają. Gdyby ktoś nagle wypadł z przyspieszającej rakiety i niechcący znalazł się za horyzontem zdarzeń – już nigdy nie uda mu się powrócić na pokład, żeby opowiedzieć, co zobaczył. Musiałby bowiem w tym celu rozpędzić się do prędkości większej niż światło, a to wydaje się niemożliwe, bo wymagałoby nieskończonej energii.

†††

I to już wszystko, co trzeba wiedzieć, żeby zrozumieć fenomen czarnych dziur. Przed nami najlepsze. Zacznijmy od przywołania zasady równoważności. Skoro obecność horyzontu zdarzeń jest nieuniknioną konsekwencją ruchu z przyspieszeniem, to horyzont zdarzeń powinien również pojawić się w zjawiskach związanych z grawitacją! Czyli że grawitacja powinna w pewnych sytuacjach wytwarzać horyzont zdarzeń, za który można wpaść, ale zza którego nie da się już powrócić. I rzeczywiście, tego typu „grawitacyjny" horyzont zdarzeń rzeczywiście może istnieć!

Każde ciało posiadające masę ma pewien potencjalny horyzont zdarzeń. Na przykład horyzont zdarzeń Ziemi byłby sferą

o rozmiarach orzecha włoskiego. Promień tej sfery nazywa się *promieniem Schwarzschilda.* Oznacza to, że ściśnięcie Ziemi do rozmiarów mniejszych niż jej promień Schwarzschilda wtłoczy ją w całości za horyzont zdarzeń, zza którego nic na zewnątrz już nie zdoła powrócić. Gdybyśmy zatem potrafili ścisnąć Ziemię do tak małych rozmiarów, stworzylibyśmy z niej niewielką czarną dziurę. Jest to oczywiście niewykonalne ze względów praktycznych, bo wymagałoby niewyobrażalnych sił (poza tym ekolodzy mogliby zakwestionować zasadność takich działań).

Istnieją jednak w przyrodzie obiekty, które nie potrzebują żadnego ściskania – same z siebie zamieniają się w czarną dziurę, zapadając się do swojego centralnego punktu pod własnym ciężarem. Są to gwiazdy, których masa kilkukrotnie przekracza masę Słońca. I jest takich w Kosmosie na pęczki. Każda gwiazda, w tym również nasze Słońce, świeci dlatego, że wypala znajdujące się wewnątrz paliwo jądrowe. Paliwo to, spalając się, nie tylko świeci, ale również rozsadza gwiazdę na zewnątrz, zapobiegając samoczynnemu zapadaniu się jej pod wpływem własnego ciężaru. Ale nic nie trwa wiecznie. Gdy tylko paliwo jądrowe gwiazdy zupełnie się wypali, gwiazda nie tylko natychmiast przestanie świecić, ale równocześnie zacznie się k u r c z y ć. A jeśli będzie odpowiednio duża, siła grawitacji będzie tak wielka, że nic nie będzie w stanie tego procesu powstrzymać.

Słońce jest do tego zbyt małe i lekkie, więc ono akurat nigdy nie zamieni się w czarną dziurę. Ale w przypadku kilkukrotnie większych gwiazd taki właśnie jest ich nieunikniony los.

Gdy cała masa gwiazdy znajdzie się wewnątrz horyzontu zdarzeń, powstaje czarna dziura. Czyli obiekt, z którego nic nie może się wydostać. Nawet światło! I stąd właśnie bierze się nazwa czarnej

dziury. Jej grawitacja jest tak silna, że nawet światło wciągane jest do wewnątrz.

To jednak jeszcze nic. Najbardziej zaskakująca własność czarnych dziur wyjdzie na jaw dopiero za moment. Przypomnijmy sobie przykład z obracającą się karuzelą. Zauważyliśmy, że brzeg karuzeli porusza się szybciej niż środek, więc w miarę oddalania się od osi obrotu czas będzie spowalniał coraz bardziej i bardziej. Z punktu widzenia obserwatora kręcącego się wraz z karuzelą działają na niego siły odśrodkowe skierowane na zewnątrz. Na mocy zasady równoważności można by wnioskować, że gdyby grawitacja mogła być skierowana na zewnątrz jakiegoś ciała, czas spowalniałby coraz bardziej w miarę oddalania się od centrum. Jednak dla rzeczywistych ciał grawitacja skierowana jest zawsze do środka, co oznacza, że czas powinien spowalniać w miarę zbliżania się do grawitującego ciała.

W przypadku Ziemi efekt ten, zwany *grawitacyjną dylatacją czasu*, jest bardzo słaby i nie odczuwamy go na co dzień. Chociaż w zasadzie nasze stopy starzeją się nieco wolniej niż nasza głowa. Efekt ten jest jednak wystarczająco istotny, by trzeba było go uwzględniać w algorytmach systemu GPS. Satelity są tak daleko od nas, że grawitacyjna dylatacja czasu daje się im we znaki. I gdyby nie uwzględnienie spowolnienia upływu czasu pod wpływem ziemskiej grawitacji, system GPS myliłby się w określaniu naszego położenia nawet o kilkadziesiąt metrów. Inne, bardzo precyzyjne pomiary pozwalają zresztą wykryć grawitacyjną dylatację czasu na Ziemi, na różnicach wysokości rzędu zaledwie kilkunastu centymetrów! Czyli dałoby się doświadczalnie stwierdzić, że włosy na czubku naszej głowy rosną szybciej niż włosy na brodzie!

Ale dopiero w przypadku czarnych dziur, w pobliżu których grawitacja jest ekstremalnie silna, grawitacyjna dylatacja czasu przyjmuje skrajne wartości. W miarę zbliżania się do horyzontu zdarzeń odczuwalna siła grawitacji staje się dosłownie nieskończona. Co zaś dzieje się z biegnącym tam czasem? Czas kompletnie się tam... z a t r z y m u j e! Chyba czas się nad tym zatrzymać, by przez chwilę przetrawić wnioski.

†††

Zatrzymywanie się czasu na horyzoncie zdarzeń prowadzi do zadziwiających konsekwencji. Gdybyśmy znaleźli się w pobliżu czarnej dziury i wrzucili do niej jabłko – zacznie się ono gwałtownie rozpędzać i po krótkim czasie osiągnie prędkość równą połowie prędkości światła. Jednak w tym momencie stanie się coś dziwnego. Jabłko, zamiast dalej się rozpędzać, zacznie hamować! Mimo że czarna dziura ciągnie je coraz mocniej ku sobie. Stanie się tak dlatego, że jabłko znajdzie się w obszarze ekstremalnej grawitacyjnej dylatacji czasu. Efekt ten zdominuje cały ruch i za sprawą spowalniającego upływu czasu jabłko zacznie stopniowo zwalniać, aż wreszcie zatrzyma się zupełnie tuż przed samym horyzontem zdarzeń! Z perspektywy obserwatora przyglądającego się wszystkiemu z bezpiecznej odległości jabłko nigdy nie przekroczy horyzontu zdarzeń, mimo że będzie do niego przyciągane z nieskończoną siłą! Zatrzymanie upływu czasu okaże się bowiem dominujące.

A jak wyglądałby punkt widzenia robaka siedzącego w spadającym jabłku? Okazuje się, że byłby on z u p e ł n i e inny! Spójrzmy raz jeszcze na poniższy rysunek przedstawiający przyspieszającą rakietę oraz jej horyzont zdarzeń. Horyzont ten jest

obecny wyłącznie z perspektywy podróżujących rakietą astronautów. Z punktu widzenia ciała, które spoczywa bądź porusza się ze stałą prędkością, horyzont taki w ogóle nie występuje. Jeśli więc wyrzucimy z rakiety jabłko, będzie ono odtąd poruszać się ze stałą prędkością i wkrótce minie horyzont zdarzeń, na którym nie wydarzy się nic godnego uwagi, co doskonale widać na rysunku.

Na mocy zasady równoważności spoczywające jabłko jest jednak równoważne jabłku swobodnie spadającemu na czarną dziurę. Bo spadku swobodnego w ogóle się nie odczuwa. Osobie spadającej przez większość czasu będzie się wydawać, że po prostu lewituje w stanie nieważkości. A to oznacza, że z perspektywy robaka siedzącego w jabłku dostanie się za horyzont zdarzeń czarnej dziury jest nie tylko możliwe, ale na samym horyzoncie w ogóle nie wydarzy się w ogóle nic godnego uwagi!

Jest to względność zdarzeń posunięta do ekstremum. Z punktu widzenia obserwatora znajdującego się w pewnej odległości od czarnej dziury – n i c nie może wpaść do środka. Podczas gdy z punktu widzenia wpadającego tam robaka jest to nie tylko

możliwe, ale również sam moment przekroczenia horyzontu nie dostarcza żadnych s z c z e g ó l n y c h wrażeń.

Żeby tego było mało, sytuacja robi się jeszcze dziwniejsza za sprawą zjawisk kwantowych, o których napiszę później...

No więc, jak jest naprawdę: robak wpadnie do środka czarnej dziury czy też nie wpadnie? Jest to kwestia względna. Zależy od wyboru obserwatora. Tak samo, jak względna jest kwestia, czy dwa końce kija są „równo oddalone", czy też nie, od której wszystko się zaczęło. Jeśli wydaje się to komuś niewiarygodne, to nic dziwnego. Bo rzeczywistość czarnych dziur jest niewiarygodna. Nawet Einstein nie mógł w nią uwierzyć. I teraz już chyba wiemy, dlaczego.

†††

Obserwacyjnie namierzono już sporą liczbę czarnych dziur. Największa w naszej okolicy, *Sagittarius A*,* o masie kilku milionów Słońc, znajduje się w samym centrum naszej galaktyki. I zgodnie ze znanymi nam prawami fizyki nie istnieje sposób, żeby zajrzeć do środka i powrócić na zewnątrz. Dzięki ogólnej teorii względności możemy jednak o b l i c z y ć, co działoby się z nami po przekroczeniu horyzontu zdarzeń. Zresztą jeszcze przed wpadnięciem za horyzont zdarzeń mogłoby nas spotkać sporo ciekawych rzeczy.

Wiemy, że światło, które zahaczy o horyzont zdarzeń, musi zostać zassane do wewnątrz. Można więc sobie wyobrazić, że w niewielkiej odległości nad horyzontem zdarzeń powinno być gdzieś miejsce, w którym grawitacja nie jest jeszcze aż tak silna, żeby wciągnąć światło do środka, ale wystarczająco mocna, by światło latało tam wokół czarnej dziury po zamkniętych

orbitach. Okazuje się, że takie miejsce rzeczywiście istnieje i jest mniej więcej w odległości równej półtora promienia Schwarzschilda. Będąc tam, moglibyśmy spojrzeć w bok i zobaczyć światło naszych własnych pleców, które zdążyło okrążyć czarną dziurę. W tym położeniu znajduje się więc dość osobliwy gabinet luster w pustej, lecz ekstremalnie zakrzywionej czasoprzestrzeni.

Ogólna teoria względności przewiduje, że jabłko, które przekroczyło horyzont zdarzeń, w krótkim czasie wyląduje w centralnym punkcie czarnej dziury, zwanym *osobliwością*. Nie da się tego w żaden sposób uniknąć. Cokolwiek trafi za horyzont zdarzeń, nieuchronnie dociera do znajdującej się w samym centrum osobliwości. Siły pływowe w jej pobliżu wzrastają do nieskończoności. A zatem rozerwą one na kawałki wszystkie znane fizyczne struktury, nawet pojedyncze atomy.

Możemy jedynie spekulować, jak taki proces byłby zmodyfikowany przez zjawiska kwantowe, których ogólna teoria względności, *nomen omen*, nie uwzględnia. W każdym razie przyszłość robaka wpadającego do środka osobliwości wcale nie rysuje się w różowych barwach. Od czarnych dziur na wszelki wypadek lepiej trzymać się z daleka.

Dotknęliśmy właśnie aktualnych granic ludzkiej wiedzy na temat zjawisk związanych z grawitacją. Z różnych względów nie wiemy, co dzieje się w bezpośrednim o t o c z e n i u osobliwości, wewnątrz czarnej dziury. Podejrzewamy jednak, że ogólna teoria względności przestaje obowiązywać w tym obszarze i załamują się tam w s z y s t k i e znane prawa fizyki. Jest to jeden z najtrudniejszych problemów, na którym ugrzęzła współczesna nauka. Mamy do czynienia z niezwykłą dziurą, dziurą myślową, której od ponad stu lat nikomu nie udało się zatkać.

# ROZDZIAŁ SZÓSTY

## *planeta cieni*

ZA SIEDMIOMA CHMURAMI, za siedmioma czarnymi dziurami, była sobie niewielka planeta zamieszkana przez dziwne stworzenia, które zachowywały się jak ludzie, miały podobne zwyczaje, ale coś istotnego je od nas odróżniało. Była to nietypowa fizjonomia. Stwory te były bowiem płaskie jak naleśniki. Zamiast chodzić po swojej planecie obunóż jak my, pełzały po powierzchni niczym cienie. Mieszkały w cieniowych domach, polowały na cieniową zwierzynę i hodowały cieniowe roślinki. Cienie spędzały swoje życie, rozpłaszczone na powierzchni planety, i nie potrafiły nawet podskakiwać. Uczeni spierają się, czy cienie w ogóle wiedziały o istnieniu trzeciego wymiaru, bo w ich języku nie było nawet słów na określenie pojęć „góra" i „dół".

Życie na planecie toczyło się całkiem spokojnie aż do wybuchu straszliwej wojny. Wszystko zaczęło się od zwykłej awantury: cienie pokłóciły się o to, czy poprawna jest pisownia słowa „zrzynać" czy też „zżynać". Doszło do podziału na dwa wrogie obozy, a zwolennicy litery ż zostali brutalnie osaczeni, przez zwolenników rz.

Przed zagładą uratowało ich tylko to, że w ostatniej chwili zdołali obwarować się murem obronnym wykonanym z cieniowej cegły. Mur ten dał im taktyczną przewagę i w niedługim czasie role się odwróciły. Zwolennicy ż zza swojego muru prowadzili działania

zaczepne i zaczęli zdobywać militarną przewagę, wygrywając kolejne bitwy.

Po każdym zwycięstwie, gdy zdobyty zostawał nowy obszar, cienie obwarowane murem burzyły go i wznosiły nowy, coraz dłuższy, bo okalający całe powiększone terytorium. Fabryki pełną parą produkowały więc cieniowe cegły. Przewaga zwolenników zżynania przez ż stopniowo się powiększała, a ich imperium wciąż rosło.

Po kilku latach wojny wydarzyło się jednak coś nieprzewidzianego. Oddziały zwolenników ż po raz kolejny podbiły nowe obszary i już miano prosić o dostarczenie nowych cegieł do budowy dłuższego muru, gdy okazało się to... zupełnie niepotrzebne. Wyszło bowiem na jaw, że z tych samych cegieł udało się wznieść nowy mur otaczający powiększone terytorium. Wzbudziło to powszechne zdziwienie, lecz w ferworze walk szybko o tym zapomniano, podejrzewając, że doszło do zwykłej pomyłki.

Temat powrócił jednak po kolejnych sukcesach bitewnych. Okazało się, że przy następnej odbudowie muru, nie dość że nie trzeba było dostarczać nowych cegieł, to jeszcze część starych pozostała niezużyta!

Doprowadziło to do niemałej konsternacji i nawet najstarsi mędrcy nie potrafili tego nijak wyjaśnić. Niepokój pogłębił się jeszcze bardziej, gdy sytuacja zaczęła się odtąd powtarzać. A nieużytych cegieł zaczęło przybywać. Każdy kolejny mur okalający rozrastające się terytorium okazywał się coraz krótszy i krótszy.

My, ludzie dysponujący wyobraźnią przestrzenną, możemy zrozumieć, cóż takiego zaszło. W pewnym momencie mur budowany na planecie cieni przekroczył swymi rozmiarami równik i zaczął zacieśniać się na przeciwległej półkuli. Apogeum całej

sytuacji nastąpiło wówczas, gdy oddziały, które wyruszyły w przeciwnych kierunkach na podbój wroga, ponownie się spotkały, nadchodząc ze wszystkich stron na przeciwnym biegunie.

Cienie były kompletnie zdezorientowane. Wojna była skończona, a armia zwolenników zrzynania przez rz doszczętnie rozbita. Co prawda, niektórych wciąż frapował fakt, że wyruszając w jakimś kierunku i podążając wprost przed siebie, można wrócić do punktu wyjścia, nadchodząc z przeciwnej strony. I nikt nie potrafił tego wyjaśnić. Cienie jednak zadziwiająco szybko do tego przywykły. Na planecie zapanował nowy ład, a pisownię słowa „zżynać" wpisano do konstytucji.

I nie ma się z czego śmiać, w naszej własnej konstytucji wpisane jest jak wół, że polski ustrój „urzeczywistnia" zasady „sprawiedliwości społecznej". Nieśmiało zwrócę uwagę, że są tylko dwie możliwości. Albo „sprawiedliwość społeczna" oznacza po prostu „sprawiedliwość", a wówczas dodatkowy przymiotnik jest zbędny, albo też oznacza coś innego niż sprawiedliwość. Ale wówczas istnieje już na to inne określenie i jest nim „niesprawiedliwość".

Dla nowego pokolenia cieni, przyzwyczajonego od urodzenia, że podróżując na wprost, wraca się zza pleców, przestało to być nawet czymś zaskakującym. A z czasem stało się to wręcz „oczywiste". Więcej emocji wzbudzały pogłoski o odradzającym się ruchu oporu, walczącym o przywrócenie pisowni zakazanego słowa „zrzynać" przez rz.

Czy będzie dużą niespodzianką, jeśli powiem, że jest niewykluczone, że i my żyjemy w podobnym, zamkniętym świecie? Świecie, w którym wyruszając rakietą w jakimś kierunku i trzymając się obranego kursu, po odpowiednio długim czasie

powraca się do punktu wyjścia? Ogólna teoria względności wcale takiego scenariusza nie wyklucza.

Osobom cierpiącym na klaustrofobię mogło od tej informacji zrobić się nieco duszno, bo zamknięty wszechświat stanowiłby dla nas klatkę nie tylko metaforyczną. Cieniom trudno było sobie uzmysłowić, że żyją na powierzchni kuli. Pojęcie kuli było bowiem kompletnie obce ich intuicji. Dla nas również główną przeszkodą w odkrywaniu mechanizmów działania rzeczywistości stanowi niezbyt elastyczny mózg.

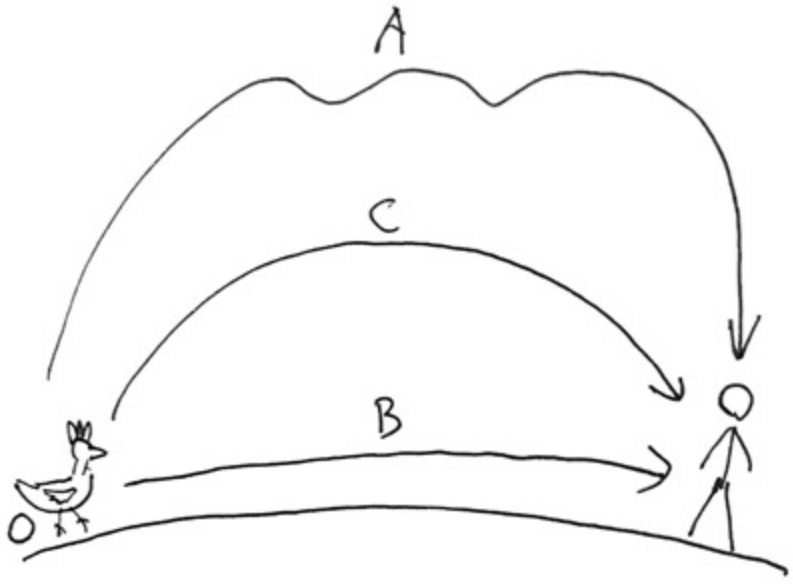
Bardzo pożytecznym narzędziem w walce z ograniczeniami naszej wyobraźni jest matematyka. Działa ona jak p r o t e z a mózgu, pozwalając nam analizować zagadnienia mało dla nas intuicyjne. Pomaga na przykład obchodzić się w prosty sposób z wielowymiarowymi obiektami, zbyt trudnymi do ogarnięcia naszą trójwymiarową wyobraźnią przestrzenną, a banalnymi w opisie matematycznym. Poznanie języka matematyki wymaga sporo wysiłku, jednak władając nim, możemy analizować zagadnienia wykraczające poza możliwości nieuzbrojonego mózgu. Na planecie cieni bardzo przydałby się dobry matematyk.

†††

Mimo wszystko, nasza sytuacja poznawcza jest bez porównania lepsza niż sytuacja, dajmy na to, kury sprawiającej wrażenie zwierzęcia silnie znerwicowanego. I nic dziwnego, skoro odsetek przedstawicieli jej gatunku, który pada ofiarą morderstwa, wynosi 100%. Nawet do przygotowania fileta w panierce należy pozbawić życia całą kurzą rodzinę: zarówno mamę kurę, jak i jej nienarodzone dziecko.

Kura jest urządzeniem stworzonym przez j a j o i służącym do produkcji innych jaj. Jaja zaś bywają pożyteczne. Można nimi na przykład rzucać w filozofów. Najlepsze są do tego jaja zepsute. Co jednak zrobić, jeśli dysponujemy wyłącznie jajem świeżym? Można wykorzystać prawa teorii względności, by sprawić, żeby jajo zestarzało się w trakcie lotu tak bardzo, jak to możliwe. A zatem lądując na głowie nielubianego filozofa, zadałoby mu bardzo smrodliwy cios.

Wyobraźmy sobie, że nasza kura zniosła właśnie świeże jajo i chcielibyśmy nim rzucić w filozofa, który za moment będzie wygłaszać publiczny referat o czasoprzestrzeni. Niestety, nie zdążymy osobiście dojechać na miejsce i możemy jedynie przyczepić jajo do zdalnie sterowanego drona, który zaniesie jajo, gdzie trzeba. Sytuację ilustruje poniższy rysunek.




Istnieje wiele możliwych trajektorii prowadzących od kury do filozofa, które moglibyśmy wybrać. Kilka z nich przedstawiliśmy powyżej. Trajektoria *A* wiedzie na przykład wysoko nad Ziemią,

gdzie grawitacja jest słabsza, a zatem czas płynie szybciej. Jest nam to akurat na rękę, bo dzięki temu jajo zdąży się bardziej zestarzeć w trakcie swego dziewiczego lotu. Można by zatem pomyśleć, że najlepiej jest wysłać jajo tak wysoko, jak to możliwe. Byle tylko zdążyło wylądować na czas. A jednak sprawa nie jest aż tak prosta.

Szkopuł w tym, że jajo wysłane wysoko będzie musiało poruszać się po długiej drodze, a więc z dużą prędkością, żeby zdążyć osiągnąć cel o wyznaczonej godzinie. A za sprawą owej prędkości dylatacja czasu spowoduje, że jajo będzie starzeć się wolniej. A tego chcielibyśmy uniknąć.

Z drugiej strony, jeśli wyślemy drona z jajem nisko przy Ziemi, jak pokazuje trajektoria *B*, będzie ono mogło poruszać się z mniejszą prędkością (bo droga jest krótsza), a zatem dylatacja czasu będzie słabsza. Niestety, lecąc nisko, jajo znajdzie się w silniejszym polu grawitacyjnym i z tego powodu czas upływający wewnątrz skorupki także spowolni. Cóż więc począć?

Należałoby znaleźć pewną optymalną trajektorię, zaznaczoną na rysunku literą *C*, dla której czas starzenia będzie możliwie największy. Mogłoby się zdawać, że tak postawione zadanie jest szalenie trudne do rozwiązania i wymaga szczegółowej analizy. Okazuje się jednak, że jest wprost przeciwnie – problem ma rozwiązanie banalne. Jak sterować ruchem drona? Otóż nie należy nim w ogóle sterować. Wystarczy nadać jaju w chwili początkowej odpowiednią prędkość, a następnie kompletnie wyłączyć silniki i pozwolić mu lecieć ruchem swobodnym, aż osiągnie zamierzony cel. Czyli po prostu r z u c i ć jajem.

Okazuje się, że właśnie swobodna trajektoria, gdy nie ma żadnych włączonych silników, charakteryzuje się tym, że wzdłuż niej upływ czasu jest maksymalny. Innymi słowy, pole grawitacyjne w pewien zadziwiający sposób s a m o „wie”, jak

pokierować jajkiem, aby zmaksymalizować siłę rażenia. Wynik ten stawia w dość niezręcznej sytuacji Alberta Einsteina, który zwykł mawiać, że *natura jest wyrafinowana, ale nie jest złośliwa*.

Tylko s k ą d u licha jajko oraz wszystkie inne swobodnie spadające ciała wiedzą, jak się poruszać w polu grawitacyjnym, żeby starzenie było maksymalne? To przecież nie może być zbieg okoliczności.

No i nie jest. Teoria względności dostarcza dość prostego uzasadnienia tego faktu na gruncie znanych, elementarnych praw ruchu. Pisałem niedawno o paradoksie bliźniąt, w którym spoczywający na stacji Stacjusz zestarzał się bardziej niż jego brat Rakiet lecący przyspieszającą rakietą. Okazuje się, że w polu grawitacyjnym jest dokładnie tak samo. Aby zestarzeć się jak najbardziej, nie można włączać silników.

Trzeba jednak przyznać, że uzasadnienie to pozostawia pewien niedosyt. Wszystko wygląda bowiem na bardzo misterną konspirację. A może, na przykład, poruszające się ciało chce się za wszelką cenę zestarzeć jak najbardziej? W tym celu bada wszystkie możliwe trajektorie, robiąc to sobie tylko znanymi sposobami, i wybiera tę jedną, jedyną? W naszej paranoidalnej teorii najciekawsze jest to, że jest ona... p r a w d z i w a!

Wkrótce się o tym przekonamy, badając zjawiska k w a n t o w e. Okaże się, że poruszające się ciało naprawdę w pewien niesamowity sposób o b w ą c h u j e wszystkie hipotetyczne trajektorie, którymi mogłoby się poruszać. Jak się to dokładnie odbywa, przekonamy się w dalszych rozdziałach. I po raz kolejny okaże się, że gdyby świat był taki, jaki nam się wydaje, że jest, to by był z u p e ł n i e inny.

# ROZDZIAŁ SIÓDMY

## *czy diabeł gra w kości?*

WOLFGANG PAULI, CUDOWNE DZIECKO, które wyrosło na jednego z twórców teorii kwantowej, znany był z arogancji. Gdy jednak przyszło do mechaniki kwantowej, gwałtownie spokorniał, wyrażając się o niej następująco:

*Fizyka jest dla mnie za trudna i żałuję, że nie*
*zostałem aktorem komediowym lub kimś w tym*
*rodzaju, aby nigdy nie słyszeć więcej o fizyce.*

Inny ojciec teorii kwantów, Erwin Schroedinger, mówił o niej tak:

*Jeśli te przeklęte przeskoki kwantowe rzeczywiście*
*pozostaną w fizyce, to nie wybaczę sobie,*
*że w ogóle związałem się z teorią kwantów.*

Hendrik Kramers wypowiedział się nieco bardziej refleksyjnie:

*Teoria kwantów przypomina niektóre*
*zwycięstwa: śmiejemy się przez dwa miesiące,*
*a potem płaczemy przez długie lata.*

Również i słynny Hendrik Lorentz, prekursor teorii względności, na stare lata nieomal popadł w depresję:

*Straciłem przekonanie, że moja praca naukowa prowadziła do obiektywnej prawdy i nie wiem, po co żyłem; żałuję, że nie umarłem pięć lat wcześniej, gdy jeszcze wszystko wydawało mi się jasne.*

Inaczej do umierania odnosi się Woody Allen:

*W kwestii śmierci moje stanowisko pozostaje niezmienione – jestem przeciw.*

Tymczasem przyszła nasza kolej, by poznać teorię kwantową. Do lektury powinniśmy przystąpić ostrożnie.

Za odkrycie mechaniki kwantowej przyznano ponad 10 Nagród Nobla. Otrzymali je między innymi Bohr, Born, de Broglie, Dirac, Einstein, Feynman, Heisenberg, Pauli, Planck oraz Schroedinger. A jednak prawie połowa z nich nie wierzyła w prawdziwość teorii, którą sami współtworzyli. Einstein do śmierci często pomstował na mechanikę kwantową, narzekając, że *Bóg nie gra w kości.*

Zważywszy, że już wtedy teoria kwantowa potwierdzona była przez wszystkie eksperymenty, zachowanie Einsteina przypominało zachowanie podróżnika, który natrafiwszy po raz pierwszy na żyrafę, miał powiedzieć: *takie zwierzę nie istnieje.* Born wytknął nawet Einsteinowi, że zwalcza teorię kwantową równie stanowczo, jak sam był do niedawna tępiony przez przeciwników teorii względności. Skąd aż taki opór Einsteina, Schroedingera i całej reszty?

Mechanika kwantowa to opis rzeczywistości na poziomie pojedynczych atomów i cząstek, czyli fundamentów istnienia c a ł e j znanej nam klatki na ludzi. Wbrew rozpowszechnianym plotkom, istota teorii kwantowej wcale nie jest skomplikowana. Wręcz przeciwnie, jej esencja jest na tyle prosta, że można wyjaśnić

ją nawet osobie bez żadnego matematycznego przygotowania. Reakcja jest jednak niemal zawsze taka sama. Jest nią niedowierzanie. I jest to najczytelniejsza oznaka, że teoria ta rzeczywiście z o s t a ł a zrozumiana.

W pierwszym zetknięciu kwantowy opis rzeczywistości zaskakuje chyba jeszcze bardziej niż teoria względności. Winna temu jest oczywiście nie rzeczywistość, która jest, jaka jest, lecz ludzka naiwność. Pod koniec XIX wieku ludziom zdawało się już, że wiedzą o świecie całkiem sporo, a odkrycie teorii kwantowej niespodziewanie dostarczyło kubła zimnej wody na rozgrzane głowy. Dotarło wówczas do wszystkich, że to, co wydawało się fundamentalnymi prawami przyrody, było w dużej mierze zbiorem przybliżeń lub wręcz przesądów. I ciekawe, że cała ta naukowa rewolucja rozpoczęła się całkiem niewinnie, od pewnego drobiazgu, który nie pasował do ówczesnej układanki...

†††

Najpierw ludzie natrafili na tajemnicze nowe siły potrafiące działać na różne przedmioty na odległość. Nazwano je siłami elektrycznymi i magnetycznymi. Michael Faraday, syn kowala i samouk, który nauczył się fizyki, pracując jako dziecko w zakładzie introligatorskim, zaczął eksperymentować z nowo odkrytym zjawiskiem – prądem elektrycznym. Po Anglii rozeszła się wieść o niezwykłych doświadczeniach prowadzonych przez genialnego młodzieńca. W odwiedziny pofatygował się do niego nawet jeden z ministrów królewskiego rządu. No i kiedy dygnitarz zapytał Faradaya, na co komu ten cały prąd elektryczny, ten odrzekł: *nie wiem, na co to komu, ale pewnie wkrótce zostanie to opodatkowane*.

Faraday wychowywał się na wsi i napatrzył się w dzieciństwie na pola uprawne zaorane w kształt podłużnych linii. Gdy wiele lat później robił swoje eksperymenty ze zjawiskami elektromagnetycznymi, spostrzegł w nich coś, co przypominało mu owe linie. Nikt wtedy zbyt dobrze nie rozumiał jeszcze, czym jest elektryczność i magnetyzm, ale trzeba było wprowadzić jakąś nazwę. I w ten sposób powstało pojęcie *pola elektromagnetycznego*.

Niedługo później pewien ekscentryczny jegomość, James Maxwell, zaczął podejrzewać, że tajemnicze siły elektromagnetyczne wcale nie działają na odległość natychmiastowo, jak się wtedy zdawało, tylko z pewnym opóźnieniem. Z wykonanych przez Faradaya eksperymentów udało mu się wydedukować, że siły te muszą rozchodzić się z gigantyczną, ale nie nieskończoną prędkością. Jego podejrzenie było takie, że gdyby wziąć magnes i szybko nim potrząsnąć, to wywołane w ten sposób zaburzenie magnetyczne rozchodziłoby się we wszystkich kierunkach z ogromną prędkością, którą można było wyznaczyć na podstawie istniejących danych eksperymentalnych. To samo z polami elektrycznymi zaburzanymi poprzez machanie ładunkiem elektrycznym.

Maxwell zdołał przewidzieć prędkość rozchodzenia się takiego zaburzenia, a wartość, którą uzyskał, bardzo go zaskoczyła. Niewiele bowiem różniła się ona od zmierzonej niedługo wcześniej prędkości rozchodzenia się ś w i a t ł a, na temat którego nie wiedziano wtedy zbyt wiele. Maxwell połączył kropki i postawił śmiałą hipotezę, że światło j e s t zaburzeniem wszechobecnego pola elektromagnetycznego, rozchodzącego się w formie fali.

Z hipotezy tej wynikało, że gdyby bardzo szybko machać ładunkiem elektrycznym w górę i w dół, powinien on zacząć

wytwarzać drgające pole elektromagnetyczne. Czyli gdyby na przykład naelektryzować bursztyn, pocierając nim o wełniany sweter, a następnie zacząć nim machać, to drgający bursztyn zacząłby... ś w i e c i ć! Brzmi niewiarygodnie? No ale tak właśnie działa żarówka! Włókno żarówki to nic innego, jak drut rozgrzany do ogromnej temperatury przez przepływający przez niego prąd. Taki prąd potrąca znajdujące się we włóknie naładowane cząsteczki, pobudzając je do drgań, co wywołuje świecenie.

Zresztą na tej samej zasadzie działa antena radiowa, wewnątrz której w górę i w dół latają ładunki elektryczne. Emitowane w ten sposób fale radiowe różnią się od światła tylko tym, że ich „kolor" jest niewidoczny dla ludzkiego oka. Maxwell strzelił więc w dziesiątkę i z jego hipotezy powstała pełnokrwista teoria elektromagnetyzmu.

Światło rzeczywiście pod wieloma względami zachowuje się jak fala. Na przykład jak fala na wodzie. Jeśli wrzucić do wody dwa kamienie, to powstałe fale będą się nawzajem przenikać i nakładać. Jeśli górka pierwszej fali trafi na górkę drugiej, a dołek trafi na dołek – powstanie w tym miejscu mocniejsza fala o wyższych górkach i głębszych dołkach. Może jednak dojść do sytuacji odwrotnej – jeśli górka trafi na dołek, dwie fale mogą się częściowo lub całkowicie wygasić. To banalne zjawisko nakładania się fal nazywa się mądrze *interferencją.*

Jeśli światło jest po prostu falą, jak podejrzewał Maxwell, powinno ono zachowywać się podobnie jak fale na wodzie. Czy dwie fale światła mogłyby się więc wzajemnie wygasić, wywołując ciemność? Musiałoby to być dość osobliwe zjawisko.

Wyobraźmy sobie, że mamy dwa źródła światła, którymi możemy oświetlić pewien przedmiot. Jeśli włączymy tylko pierwsze źródło – przedmiot stanie się jasny. Jeśli włączymy tylko

drugie – przedmiot również się rozświetli. Z hipotezy Maxwella wynika, że powinno dać się tak przygotować i ustawić dwa źródła światła, żeby po włączeniu jednego i drugiego naraz oświetlany przedmiot pozostał ciemny! O dziwo, sytuacja taka jest rzeczywiście możliwa. Za moment do tego dojdziemy, ale póki co, zostańmy jeszcze przy drgających atomach.

†††

Co zrobić, żeby wprawić w oscylacje wszystkie atomy, z których zbudowane jest jakieś ciało? Nic prostszego, wystarczy to ciało p o d g r z a ć. Ciepło jest bowiem najzwyklejszym ruchem. Chaotycznym ruchem składników materii. Jeśli coś jest ciepłe, oznacza to, że cząsteczki tego ciała drgają energiczniej, niż gdyby owo coś było zimne. Przekazywanie ciepła od jednego ciała do drugiego to rozpędzanie cząsteczek zimniejszego ciała kosztem ruchów cząsteczek ciała cieplejszego.

Nie bez powodu mówi się, że coś może być „rozgrzane do czerwoności". Gorący kawałek metalu zbudowany jest z rozedrganych cząsteczek, które ze względu na niesiony ładunek elektryczny zaczynają świecić, a kolor tego światła zależy od temperatury metalu.

W temperaturze pokojowej każde ciało świeci głęboką podczerwienią, którą można zobaczyć przez specjalne kamery termowizyjne. Jeśli jednak zwiększymy temperaturę do kilku tysięcy stopni, pojawiające się kolory będzie widać gołym okiem. Najpierw pojawi się czerwień, potem żółć, a nawet fiolet. Owe kolory, zgodnie z teorią Maxwella, odpowiadają różnym szybkościom drgań fali elektromagnetycznej. Światło czerwone odpowiada fali drgającej wolniej i emitowanej przez chłodniejsze

ciało niż światło niebieskie odpowiadające fali drgającej szybciej i emitowanej przez ciała bardziej rozgrzane. Ciekawe, że nasza codzienna percepcja barw sprowadza się do czegoś tak banalnego.

Pomysł Maxwella, że światło jest falą, tak wszystkich zainteresował, że wielu ludzi zaczęło sprawdzać, jak dokładnie zmieniają się kolory, którymi świeci rozgrzane ciało, w zależności od temperatury. No i zaczęły się problemy. Na początku zdawało się, że teoria zgadzała się mniej więcej z eksperymentem, ale przy bliższej analizie pojawiły się rozbieżności. Fizycy nie papieże i uwielbiają takie sytuacje. Rozdźwięk pomiędzy teorią a doświadczeniem to doskonała okazja do odkrycia czegoś zaskakującego. Trzeba wówczas pogłębić penetrację intelektualną tematu i zrozumieć, które spośród dotychczasowych wyobrażeń o rzeczywistości okazują się mylne. A następnie zastąpić je czymś nowym, n i e z n a n y m. Nikomu wtedy nawet się jednak nie śniło, jak daleko wszystko to zajdzie...

Gdy przez dłuższy czas nikt nie wiedział, jak wyjaśnić osobliwe zachowanie rozgrzanych ciał, przełomowego spostrzeżenia dokonał Max Planck. Zwrócił on uwagę, że wyniki eksperymentów zaczynają pasować do teorii tylko pod jednym warunkiem. Energia emitowanego światła musi składać się z malutkich, niepodzielnych p o r c j i. Porcji nazwanych *kwantami*.

Idea ta niby nie była nowa, już Newton przypuszczał, że światło składa się z niewielkich cząstek, choć nie potrafił poprzeć tego wystarczająco mocnymi argumentami. W międzyczasie odkryto atomy i wszyscy zaczęli przyzwyczajać się do myśli, że cała znana materia składa się z fundamentalnych cegiełek, jak podejrzewał już Demokryt. Czemuż więc światło miałoby być inne?

Obserwacja Plancka wydawała się z pozoru niegroźna. Ani Planck, ani Einstein, który jako jeden z pierwszych potraktował

pomysł Plancka poważnie, nie byli świadomi, do jak s z a l o n y c h wniosków hipoteza ta w sposób nieuchronny doprowadzi. Póki co, pomysł Plancka, że światło składa się z niepodzielnych porcji, był jedynym sposobem wyjaśnienia eksperymentalnych obserwacji dotyczących własności świecących ciał.

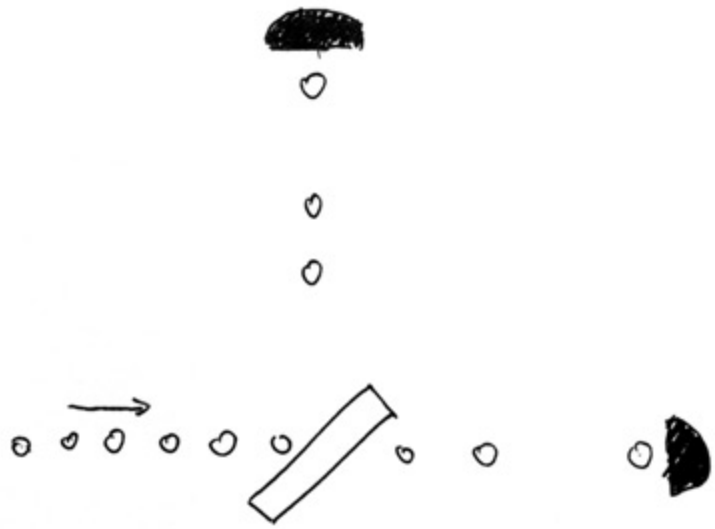
Zarówno Planck, jak i Einstein dostali po Nagrodzie Nobla za wyjaśnienie za pomocą hipotezy kwantów dwóch różnych eksperymentów, które nie dawały się wyjaśnić w żaden inny sposób. Nic jednak jeszcze nie zapowiadało a ż t a k i e j rewolucji. Czas najwyższy przejść do rzeczy. Za chwilę przekonamy się, dlaczego idea istnienia *fotonów*, bo tak nazwane zostały kwanty światła, doprowadziła do zgryzoty tylu fizyków.

†††

Wyobraźmy sobie strumień światła padający na szklaną szybę. Każda szyba przepuszcza tylko część światła, a resztę odbija albo pochłania. Wystarczy spojrzeć na własne odbicie w oknie. To, ile dokładnie światła się odbija, a ile przechodzi przez szkło, zależy od szczegółów materiału, z którego jest ono wykonane. Dla uproszczenia wyobraźmy sobie, że mamy szkło, które odbija i przepuszcza dokładnie po połowie padającego światła.

Przyjmijmy też, że światło ma jeden określony kolor, na przykład czerwony. Z teorii Plancka wynika, że taki strumień światła składa się z ogromnej liczby niepodzielnych i identycznych fotonów. Wszystkie właściwości światła, takie jak kierunek poruszania się albo kolor, muszą więc w jednakowy sposób charakteryzować każdy z identycznych fotonów, z których składa się wiązka. Czyli mówiąc ludzkim głosem, każdy z tych fotonów musi poruszać się w tę samą

stronę i mieć ten sam czerwony kolor, co reszta. Fotony są obiektami niezwykle prostymi i w rozważanym przypadku wszystkie one powinny być po prostu identyczne. Schemat naszego eksperymentu myślowego przedstawia poniższy rysunek, na którym zaznaczone są fotony padające na półprzepuszczalną szybkę.



No więc połowa z nich się odbija, a reszta przechodzi na drugą stronę, wpadając do specjalnych detektorów, które rejestrują każdy wpadający foton, jednocześnie go pochłaniając. A teraz trudne pytanie: skoro połowa fotonów ulega odbiciu, a połowa przechodzi przez szkło, to c o decyduje o tym, jak zachowa się konkretny foton, skoro wszystkie one są i d e n t y c z n e? Pomyślmy nad tym przez moment.

Niby proste pytanie, a dręczyło Einsteina do samej śmierci. Był on przekonany, że fotony muszą się od siebie czymś różnić. I to owe różnice muszą powodować, że niektóre fotony się odbijają, a inne nie. Wyobraźmy sobie na przykład, że niektóre fotony miałyby włosy, a inne nie. Może to te włosy albo jakieś inne ukryte cechy

decydują o tym, że dany foton będzie się odbijać od szyby? Wyobraźmy sobie, że tak właśnie jest, a kawałek szkła przepuszcza jedynie fotony owłosione, a łyse odbija. Tylko że wtedy kolejna, identyczna płytka szklana umieszczona na drodze odfiltrowanych owłosionych fotonów powinna spowodować, że wszystkie one ponownie przez nią przejdą... Eksperyment pokazuje jednak, że dzieje się inaczej: znów połowa padających fotonów ulega odbiciu, a połowa przechodzi przez szkło.

Pomimo wielu prób, ani w tym, ani w żadnym podobnym eksperymencie nie udało się sprowokować fotonów do zmiany zachowania – zawsze odbijała się połowa, czyli proporcje ani drgnęły. Nie udało się też dostrzec żadnej prawidłowości w zachowaniu fotonów. Statystyka pomiarów niczym nie różniła się od statystyki czysto losowej, którą moglibyśmy dostać, wielokrotnie rzucając monetą.

Być może jednak nasz kawałek szkła wcale nie jest statycznym przedmiotem, a jakieś ukryte dynamiczne procesy zachodzące wewnątrz odpowiadają za to, że foton padający w danej chwili zachowa się inaczej niż kolejny identyczny foton lądujący na powierzchni szkła chwilę później? Okazuje się, że znów nic

z tego. Zaraz okaże się, że taka ewentualność również nie daje się łatwo obronić. Ale zanim do tego dojdziemy, wysłuchajmy, co na temat zachowania pojedynczych fotonów mówi mechanika kwantowa.

A mówi ona rzecz, od której włos na głowie (a w zasadzie cała głowa) się jeży: przyczyna takiego, a nie innego zachowania pojedynczego fotonu w ogóle n i e i s t n i e j e. Foton zachowuje się w sposób fundamentalnie nieprzewidywalny i nie ma w procesie padania na szkło n i c z e g o, co decydowałoby o jego przyszłych losach. Proces odbicia bądź przejścia fotonu przez szkło jest fundamentalnie losowy, czyli *niedeterministyczny.*

Chwila, chwila. Zwolnijmy na moment i zastanówmy się, cóż takiego wygaduje mechanika kwantowa. Cała wcześniejsza klasyczna fizyka nie była niczym innym, jak skuteczną metodą przewidywania przyszłości. Na przykład prawa mechaniki Newtona pozwalały przewidzieć, gdzie upadnie kula wystrzelona z armaty. Albo za ile lat zobaczymy znów kometę Halleya obiegającą Słońce. Teoria Maxwella przewidywała, jakiego koloru światło wyemitowane zostanie przez ładunek elektryczny drgający z określoną częstością. Każde prawo fizyki nie było niczym innym, jak regułą pozwalającą przewidzieć, co stanie się w takim czy innym eksperymencie.

Do tego zresztą przyzwyczajona jest nasza intuicja. Każde zdarzenie ma „przecież" swoją p r z y c z y n ę. A każda przyczyna „musi" rodzić określony, przewidywalny s k u t e k. Jak wydarzyło się *A*, to musi wydarzyć się *B*. Jeśli wydarzyło się *B*, to tylko dlatego, że wcześniej zaszło *A*.

Nawet jeśli w rzutach monetą raz wypada orzeł, a raz reszka, to słusznie podejrzewamy, że zmienność wynika tylko z tego, że moneta podrzucana jest za każdym razem trochę i n a c z e j.

A nawet bardzo drobna różnica może doprowadzić do zmiany wyniku.

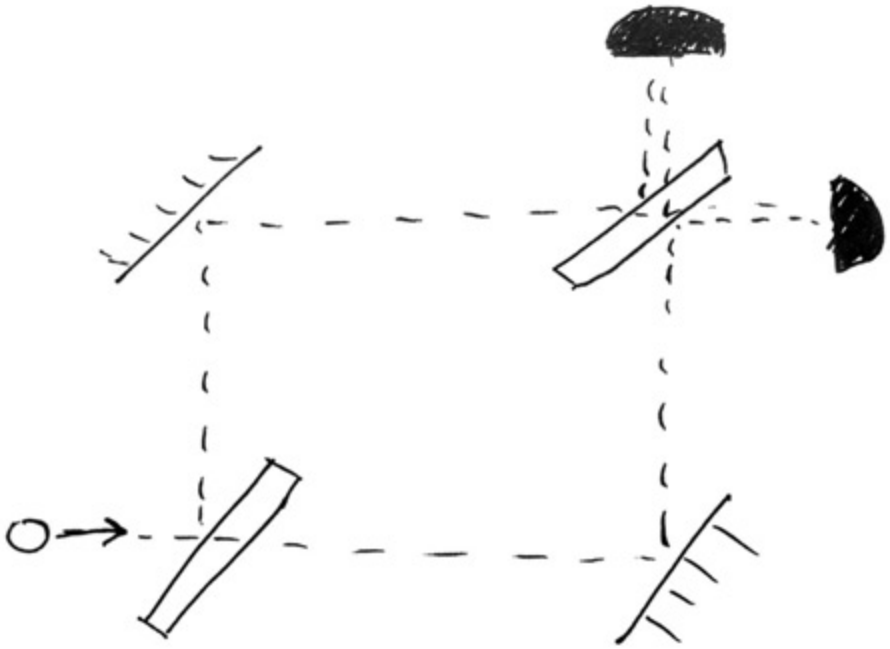
Mechanika kwantowa mówi jednak coś więcej: jeśli przepuścimy pojedynczy foton przez kawałek szkła, po czym powtórzymy eksperyment identyczny pod k a ż d y m względem. Nie podobny. Nie prawie taki sam. I d e n t y c z n y. To otrzymane wyniki m o g ą okazać się inne niż chwilę wcześniej. Mechanika kwantowa mówi, że absolutnie n i c nie decyduje o tym, co stanie się w takim eksperymencie z pojedynczym fotonem. Nie chodzi więc tylko o naszą niepełną wiedzę o fotonie. I to właśnie nie dawało Einsteinowi spokoju i dlatego do znudzenia powtarzał, że *Bóg nie gra w kości, Bóg nie gra w kości*. Po którymś razie zirytowany Bohr odrzekł mu: *przestań wreszcie mówić Bogu, co ma robić*.

†††

Oczekiwanie, że ktokolwiek po prostu przyjmie na wiarę tak zaskakujące twierdzenia, byłoby jednak czystą bezczelnością. Powróćmy więc do rozsądnie brzmiącej hipotezy, że nawet jeśli poszczególne fotony niczym się od siebie nie różnią, to wewnątrz szkła przebiega jakiś dynamiczny proces, który sprawia, że przy każdym kolejnym padającym fotonie warunki eksperymentu podlegają niewielkim, ale istotnym zmianom. Być może stoją za tym na przykład termiczne drgania atomów?

Aby to sprawdzić, przeprowadzimy rozumowanie, które pozwoli zrozumieć istotę wszystkich dziwactw teorii kwantowej. Więc trzeba teraz przestać żuć gumę i przez najbliższe cztery strony nieco zmarszczyć czoło.

Wyobraźmy sobie układ szkiełek i luster jak na poniższym rysunku. Na drodze dwóch wiązek światła rozdzielonych na kawałku szkła postawmy dwa idealne lustra, które skierują wiązki na drugie szkiełko. A zaraz za nim dwa detektory mierzące natężenie padającego światła. Jakie będą ich odczyty, gdy oświetlimy dolną płytkę szklaną silnym strumieniem światła?



Wydawać by się mogło, że detektory zarejestrują po połowie natężenia padającej wiązki. A jednak okazuje się, że nie, bo o czymś zapomnieliśmy. Można tak skonstruować nasz eksperyment, żeby całe światło wpadało wyłącznie do dolnego detektora. Jak to możliwe?

Pamiętajmy, że obie wiązki po ponownym nałożeniu na drugiej płytce szklanej będą ze sobą i n t e r f e r o w a ć. No bo są przecież falami i te fale będą się na siebie nakładać na drugim kawałku szkła. Co z tego wyniknie? Światło wpadające do górnego detektora może dotrzeć tam na dwa sposoby. W trakcie podróży górną drogą

dochodzi do trzykrotnego odbicia światła: najpierw od pierwszego kawałka szkła, później od lustra i wreszcie od drugiej szybki. Natomiast druga, dolna droga wymaga odbicia tylko raz – od lustra, ale za to światło dwukrotnie przechodzi przez szklane płytki.

I tu leży pies pogrzebany. Bo światło, podróżując przez szkło, trochę s p o w a l n i a, a więc fala podróżująca dołem będzie nieco opóźniona w stosunku do fali podróżującej górą. Opóźnienie to zależy od grubości użytych płytek szklanych. Można tak dobrać te grubości, żeby górki fali świetlnej podróżującej górną drogą trafiły dokładnie na dołki fali świetlnej podróżującej dołem. Dojdzie wówczas do *destruktywnej interferencji,* w wyniku której górny detektor pozostanie kompletnie nieoświetlony.

Ha! Jest to świetny przykład eksperymentu, o którym wspomnieliśmy już wcześniej, a w którym przedmiot oświetlony dwiema wiązkami pozostanie w cieniu, mimo że każda z wiązek z osobna by go oświetliła. Mowa o górnym detektorze.

Skoro więc światło nie wpada do górnego detektora, to musi wpaść do dolnego. Bo energia nie może po prostu zniknąć. Przyjmijmy więc, że w taki właśnie sposób skonstruowaliśmy nasz układ szkieł i luster, nazywany *interferometrem Macha-Zehndera,* że całe światło z a w s z e ląduje w dolnym detektorze.

Czas na najciekawsze pytanie: co stanie się z p o j e d y n c z y m fotonem wpuszczonym do interferometru? Jakie będą jego dalsze losy? Jak słusznie zauważył pewien komentator zawodów jeździeckich: *teraz wszystko w rękach konia.*

Wydawać by się mogło, że foton musi w jakiś sposób „zdecydować się" na jedną z dróg. Pod nieobecność innych fotonów, z którymi mógłby interferować, powinien równie często wpadać do jednego, jak i do drugiego detektora, jeśli wielokrotnie powtórzymy eksperyment. Co prawda, niezbyt wiadomo,

co miałoby d e c y d o w a ć o wyborze przez foton tej, a nie innej drogi, ale czy przychodzi nam do głowy jakieś inne rozwiązanie?

Okazuje się, że musi nam przyjść do głowy inne rozwiązanie, bo nasze wnioski są kompletnie sprzeczne z wynikami eksperymentu. Okazuje się, że foton za k a ż d y m razem wyląduje w dolnym detektorze! To oczywiście przy założeniu, że grubości płytek szklanych cały czas dobrane są w szczególny sposób, jak to wcześniej ustaliliśmy. Foton z a w s z e wyląduje na dole, ani razu na górze! Eksperyment można powtarzać do woli.

Wygląda to znowu na efekt interferencyjny, który zachodził w przypadku silnych wiązek światła. Tylko z czym niby miałby interferować j e d e n foton, skoro niczego nie ma w pobliżu? Z s a m y m s o b ą?!

No cóż, na to wygląda! Mając do dyspozycji dwa alternatywne sposoby przebycia interferometru, foton zachowuje się tak, j a k g d y b y podróżował dwiema drogami r ó w n o c z e ś n i e! Obie alternatywne ścieżki interferują dokładnie w taki sposób, w jaki interferowały dwie fale świetlne powstałe w wyniku rozszczepienia na pierwszej płytce szklanej. I w wyniku tej interferencji foton ląduje na koniec w dolnym detektorze.

Z tego, co powiedzieliśmy, mogłoby wynikać, że z jednego fotonu robią się dwa, co wydaje się przeczyć postulatowi n i e p o d z i e l n o ś c i fotonu. Aby sprawdzić, czy foton aby się nie rozdwaja, wystarczy ponownie postawić na jego drodze (drogach?) dwa detektory pochłaniające światło, umieszczone tuż za pierwszą płytką szklaną. Zadaniem urządzeń pomiarowych będzie sprawdzenie, którędy n a p r a w d ę podróżuje foton. I znów stanie się coś zadziwiającego: klikać będzie zawsze t y l k o jeden detektor, czasami górny, a czasami dolny. Obydwa nigdy. Sytuacja wygląda zupełnie tak, jak gdyby foton, zorientowawszy

się, że jest pod obserwacją, postanowił nie siać zgorszenia i zlokalizować się tylko w jednym z dwóch detektorów. Gdy natomiast nikt nie patrzy, foton zachowuje się ponownie tak, jak gdyby podróżował obiema drogami n a r a z. Czyli jak żona (lub mąż), która zmienia swoje zachowanie w zależności od tego, czy jest obserwowana, czy też nie.

I teraz możemy już powrócić do poprzedniego pytania – c o decyduje o tym, który z dwóch detektorów, umieszczonych tuż za pierwszą płytką, złapie padający na nią pojedynczy foton? Czy może za to odpowiadać jakiś nieznany dynamiczny proces zachodzący w szkle w chwili, gdy pada na nie foton? Jakaś fluktuacja?

Otóż nasze spostrzeżenie, że po usunięciu dwóch detektorów umieszczonych tuż za pierwszą płytką foton zachowuje się tak, jak gdyby poruszał się równocześnie górną i dolną drogą, wskazuje na to, że w chwili padania na pierwszą płytkę foton w c a l e nie podejmuje decyzji, czy ma się odbić, czy przejść. Realizowane są o b a scenariusze. D o p i e r o gdy wsuniemy w drogę fotonu dwa detektory, foton „zdecyduje się" na jedną z możliwych dróg.

Czyli dopiero sam akt pomiaru sprawia, że foton jest t u albo t a m, natomiast przed pomiarem położenie fotonu nie jest wcale dobrze określone. Gdyby foton podejmował decyzję o swoich dalszych losach już w chwili padania na pierwszą szklaną płytkę, nie mogłoby przecież dojść później do interferencji!

Aby uwypuklić ostatnią myśl, możemy rozważyć jeszcze bardziej perfidną wersję naszego eksperymentu. Wyobraźmy sobie, że interferometr Macha-Zehndera przedstawiony na poprzednim rysunku jest przeogromny. Że ma rozmiary Układu Słonecznego albo większe.

Jeśli przepuszczony przez pierwszą płytkę szklaną foton poleciałby w stronę Merkurego, a odbity w stronę Plutona, po krótkim czasie rozdzielone „kawałki" fotonu mogłyby znaleźć się w b a r d z o dużej odległości od siebie. My zaś moglibyśmy czekać gdzieś w pobliżu z dwoma detektorami łapiącymi fotony i zwlekać z decyzją o ich wsunięciu bądź nie, do ostatniej chwili, aż przyleci foton. Jeśli nie zdecydowalibyśmy się zmierzyć położenia fotonu – zachowałby się on tak, jak gdyby poruszał się dwiema drogami naraz. Jeśli jednak wsunęlibyśmy detektory, foton zdecydowałby się być albo tu, albo tam. Nigdy w dwóch miejscach naraz. A w dodatku to, który detektor by kliknął, rejestrując pojedynczy foton, byłoby znów całkiem przypadkowe i n i c z y m n i e z d e t e r m i n o w a n e.

Niepokojące jest też to, że w momencie pomiaru foton natychmiast sam ze sobą uzgadnia, gdzie ma zostać zarejestrowany, a gdzie nie, skutecznie unikając złapania w dwóch miejscach naraz. Nieprzewidywalność wyniku tego eksperymentu jest, według doktryn mechaniki kwantowej, f u n d a m e n t a l n y m prawem przyrody. Nie jest to tylko odzwierciedlenie naszej niepełnej wiedzy na temat tego, czym jest foton.

†††

W sytuacji gdy foton podróżuje jednocześnie górną i dolną drogą w interferometrze, taki irytujący stan fotonu nazywa się *stanem superponowanym* albo po prostu *kwantową superpozycją* dwóch alternatyw, które w klasycznej teorii uznalibyśmy za wykluczające się. Foton taki nie ma więc prawa narzekać, „że się przecież nie rozdwoi".

Moglibyśmy jednak wprowadzić w naszym eksperymencie myślowym kolejne rozwidlenia, wstawiając w ramiona interferometru kolejne płytki szklane. W ten sposób uzyskalibyśmy sytuację, w której foton zachowywałby się tak, jak gdyby był w trzech, czterech albo bardzo wielu miejscach równocześnie. Dopiero w momencie pomiaru foton lokalizowałby się w konkretnym położeniu. Pytanie „g d z i e znajduje się foton?" przed wykonaniem takiego pomiaru po prostu nie ma sensu i jest równie źle postawione, jak nasze ulubione pytanie: „czym się różni wróbelek?". Pojęcie położenia w oderwaniu od procesu pomiarowego po prostu nie ma najmniejszego sensu na poziomie pojedynczych cząstek.

Fotony nie są tu wyjątkiem. W identyczny „kwantowy" sposób zachowują się w s z y s t k i e cząstki, jakie k i e d y k o l w i e k zaobserwowano. Każdy elektron, proton albo neutron, z których jesteśmy zbudowani, znajduje się w nieskończenie wielu miejscach naraz. Cząstki te są jakby „rozmyte w przestrzeni", dopóki ich położenie nie zostanie zmierzone.

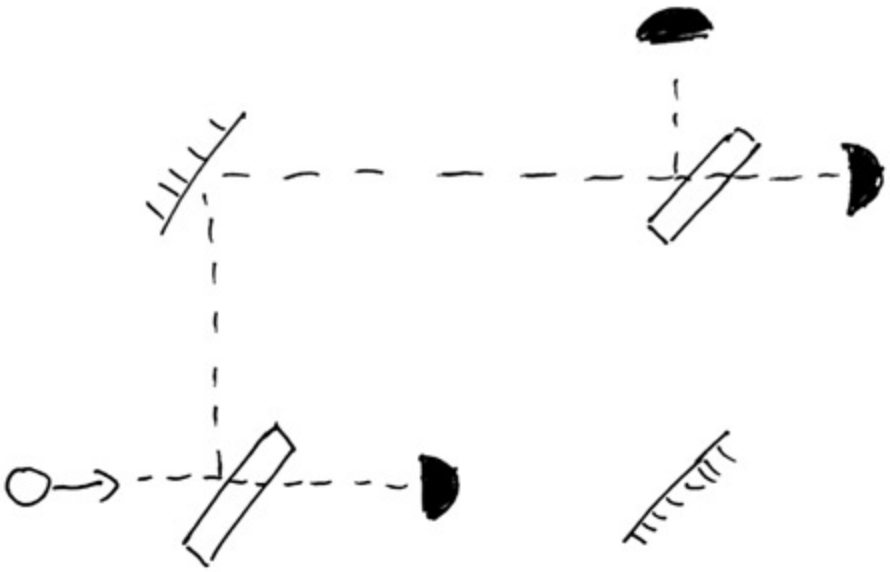
Zmuszony jestem wciąż używać cudzysłowów, gdyż potoczny język niezbyt precyzyjnie opisuje sytuację, z którą mamy tu do czynienia. Na takie *dictum* Einstein zwykł wykonywać gest twarzą i mówić złośliwie, że *Księżyc nie istnieje tylko dlatego, że patrzy na niego mysz*.

No właśnie, na czym w ogóle polega akt obserwacji? Czy potrzebna jest do niego świadomość obserwatora? Choćby obserwatorem była tylko mysz? Nie. Nie ma n a j m n i e j s z e g o znaczenia, czy obok detektora stoi świadomy obserwator czy też nikogo żywego nie ma w pobliżu. Wynik jakiegokolwiek pomiaru w ogóle od tego nie zależy.

Temat zjawisk kwantowych został jednak upodobany przez rozlicznych twórców uprawiających myślenie z dala od mózgu. Mnożą oni filozoficzne tezy o rzekomym związku pomiędzy zjawiskami kwantowymi a ludzkim umysłem. Powiedzmy jasno: nie istnieją jakiekolwiek przesłanki, żeby snuć tego typu przypuszczenia. A jeśli ktoś twierdzi, że czai się tu jakaś psychologiczna głębia, to jedynie dlatego, że zabrnął myślami na dno.

Detektorem lokalizującym foton może być cokolwiek, na czym foton może pozostawić po sobie fizyczny ślad. Nawet kartka papieru pochłaniająca foton może być traktowana jak detektor. Co zaś dzieje się z fotonem po pomiarze? Nic. Znika on, pozostawiając po sobie jedynie nieco energii, która rozprasza się wewnątrz detektora.

No dobra, a czy da się jakoś zmierzyć położenie fotonu, nie niszcząc interferencji? Co stanie się na przykład, gdy za pierwszą płytką szklaną znajdą się nie dwa detektory, a jeden, umieszczony na dolnej drodze, jak na tym rysunku?



Otóż w takiej sytuacji dolny detektor będzie klikać w 50% przypadków, a szansa na kliknięcie któregoś z pozostałych dwóch detektorów wyniesie po 25%. Nawet więc, jeśli foton n i e zostanie złapany na dolnej drodze, interferencja i tak przepadnie. Foton zachowa się więc tak, jak gdyby wiedział, że na dolnej drodze czyha na niego detektor, nawet jeśli sam do niego nie wpadnie. Wygląda to tak, jak gdyby foton „obwąchiwał" wszystkie możliwe drogi, upewniając się, że nikt nie chce go podglądać. I d o p i e r o wówczas interferuje sam ze sobą.

Od czasu odkrycia mechaniki kwantowej upłynęło mniej więcej sto lat. Przez ten czas nikomu nie udało się natrafić na j a k i k o l w i e k eksperymentalny ślad odstępstwa od przewidywań tej teorii. Mimo że mechanika kwantowa stwierdza, że nie da się p r z e w i d y w a ć wyników pojedynczych eksperymentów, pozwala ona na wyznaczyć p r a w d o p o d o b i e ń s t w a uzyskania poszczególnych wyników. Jest to obecnie najlepsza i najprecyzyjniejsza teoria, opisująca prawie całą znaną nam rzeczywistość. A mimo to jeden z jej twórców, Niels Bohr, mawiał, że *jeśli ktoś nie jest zszokowany mechaniką kwantową, to zapewne jej nie zrozumiał*.

Z praw mechaniki kwantowej można wyprowadzić własności chemiczne całej tablicy Mendelejewa. Z niej zaś wynika cała chemia, a z chemii – podobno nawet biologia. Jedynym aspektem rzeczywistości, którego nie potrafimy opisać prawami kwantowymi, jest grawitacja. Czyli dziwna siła, nieodróżnialna w niewielkich obszarach od siły pozornej występującej w układach nieinercjalnych. Cała reszta naszej osobliwej klatki na ludzi wydaje się w pełni kwantowa. Świętowaliśmy niedawno stulecie odkrycia ogólnej teorii względności opisującej grawitację. Ale może powinniśmy obchodzić stulecie n i e o d k r y c i a kwantowej

teorii grawitacji, która łączyłaby ze sobą dwie najbardziej fundamentalne teorie znane nagiej małpie?

Einstein powtarzał, że *Bóg nie gra w kości*, lecz skoro nie Bóg, to któż inny, do diabła, mógłby to robić?

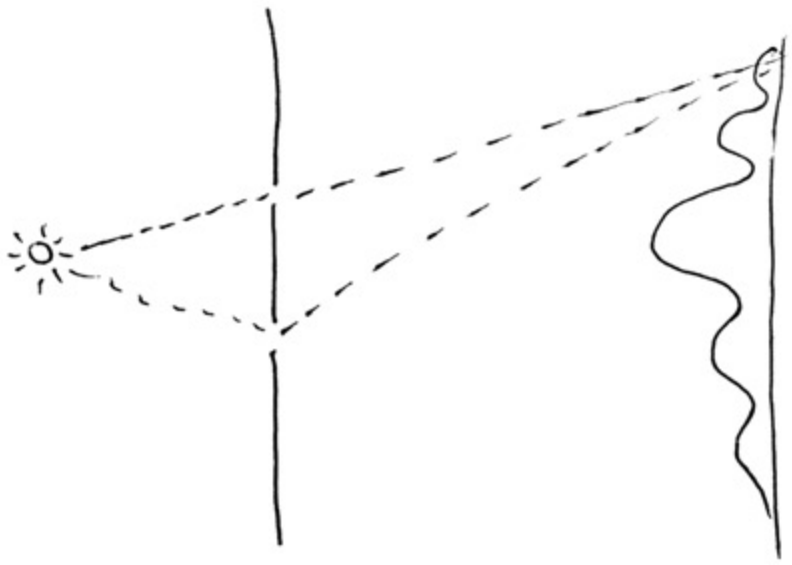
# ROZDZIAŁ ÓSMY

# *jak głęboko sięga świat kwantowy?*

LIZNĘLIŚMY NIECO DZIWNEGO ŚWIATA pojedynczych cząstek. Pamiętajmy jednak, że tym samym oblizaliśmy samych siebie, bo nasze organizmy zbudowane są z tych właśnie „pojedynczych" kwantowych cegiełek. Foton, podobnie jak elektron, neutron, proton i wszystkie inne cząstki, jeśli go nie obserwować, zachowuje się tak, jak gdyby przebywał w wielu miejscach naraz. Jest to przykład ogólnej, fundamentalnej zasady, na której oparta jest cała teoria kwantowa: jeśli dowolny obiekt kwantowy nie jest obserwowany, a mógłby ewoluować na kilka nierozróżnialnych sposobów, to zrealizuje on w s z y s t k i e możliwe historie równocześnie. Na przykład, jeśli cząstka może dotrzeć z punktu *A* do punktu *B* jedną z kilku możliwych dróg, a nie będziemy mierzyć jej położenia, wówczas cząstka przebędzie wszystkie możliwe drogi naraz.

Pisząc, że zasada ta jest w fizyce „fundamentalna", mam na myśli tylko to, że nikt nie ma zielonego pojęcia, skąd się ona bierze i dlaczego obowiązuje. Tak po prostu działa rzeczywistość, wiemy to z eksperymentów. A dlaczego jest tak, a nie inaczej? Diabli wiedzą. To właśnie mają na myśli fizycy, gdy mówią, że jakieś prawo jest „fundamentalne".

Przyjrzyjmy się nieco uważniej tej zasadzie, rozważając eksperyment Younga z podwójną szczeliną. Wyobraźmy sobie niewielkie źródło światła o określonym kolorze, a za nim przegrodę, w której wycięto dwie wąskie szczeliny. A za nimi ekran, na którym możemy obserwować padające światło. Wszystko przedstawia ten rysunek.



Co zobaczymy na ekranie? Jeśli odsłonięta byłaby tylko górna szczelina, dostalibyśmy po prostu małą plamkę światła. A gdyby odsłonić tylko dolną, na ekranie pojawiłaby się podobna plamka, tylko że niżej. A co zobaczymy po odsłonięciu obu szczelin? Okazuje się, że nie będą to wcale dwie plamki. Obraz ulegnie kompletnej zmianie. Na ekranie pojawią się liczne prążki, czyli naprzemienne paski światła i cienia. Przekrój takiego obrazu również zaznaczony jest na rysunku. Okazuje się, że jest to kolejny efekt interferencyjny.

Żeby zrozumieć, o co tu biega, zastanówmy się, jaką drogę przebywa światło docierające do punktu znajdującego się na samym środku ekranu. Może ono dotrzeć ze źródła poprzez górną albo poprzez dolną szczelinę. Ponieważ obie te drogi mają

identyczną długość, podróżujące nimi fale świetlne nałożą się na ekranie i ulegną wzmocnieniu, bo górki jednej fali trafią na górki drugiej, a dołki trafią na dołki. Na środku ekranu powinniśmy więc zobaczyć wyraźną, jasną plamkę światła. I rzeczywiście ją widać. A jak wygląda sytuacja nieco powyżej centralnego punktu ekranu? Fale świetlne, zaznaczone na rysunku przerywanymi liniami, docierające tam dwiema szczelinami, przebędą drogi różnej długości, więc górki jednej fali nieco przesuną się w stosunku do górek drugiej fali. Czyli interferencja fal nie doprowadzi do maksymalnego wzmocnienia światła i natężenie w tym miejscu ekranu będzie mniejsze niż na środku.

Przesuwając się w górę ekranu, dotrzemy w końcu do punktu, w którym górka pierwszej fali trafi na dołek drugiej. I tam znajdzie się cień. Jeszcze nieco wyżej sytuacja ponownie ulegnie odwróceniu i tak dalej. Dlatego właśnie na ekranie będzie widać naprzemienne prążki światła i cienia, nazywane *prążkami interferencyjnymi.*

No dobra, a co, jeśli źródło światła wyemituje tylko j e d e n foton? Dokąd on dotrze?

Nie da się tego jednoznacznie przewidzieć. Najbardziej prawdopodobny wariant jest taki, że foton po prostu uderzy w przegrodę i tyle go widzieli. Nasz eksperyment możemy jednak wielokrotnie powtarzać, licząc na to, że za którymś razem wyemitowany foton przeleci w końcu przez którąś ze szczelin i dotrze do ekranu. I rzeczywiście, od czasu do czasu będziemy rejestrować na ekranie niewielki błysk padającego fotonu. Błysk ten za każdym razem nastąpi w nieco innym miejscu. Jeżeli jednak każde takie położenie będziemy skrupulatnie zapisywać, a następnie sporządzimy statystykę opisującą, gdzie foton uderzał najczęściej, a gdzie najrzadziej, naszym oczom ukaże się znajomy obraz. Otrzymany histogram wyglądać będzie... dokładnie tak samo,

jak otrzymany wcześniej prążkowany obraz interferencyjny silnej wiązki światła!

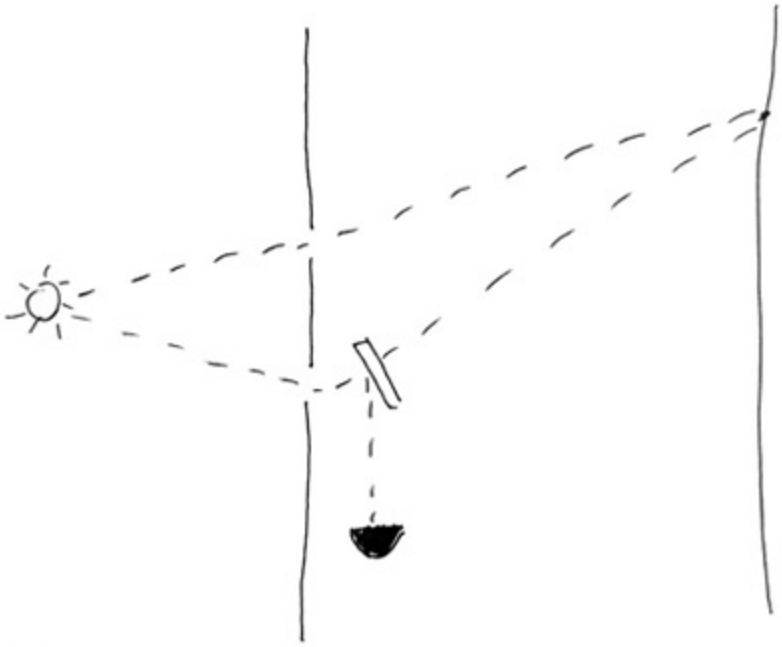
Oznacza to, że po raz kolejny pojedynczy foton zachowuje się tak, j a k g d y b y za każdym razem trafiał w ekran, przechodząc przez obie szczeliny naraz, interferując przy tym s a m z e s o b ą. Mówiąc Lechem Wałęsą, foton *przeszedł górą, a nawet dołem*.

Paul Dirac, jeden z twórców teorii kwantowej, powiedział wręcz, że za każdym razem, gdy widać jakiś efekt interferencyjny, k a ż d y foton z osobna interferował wyłącznie sam ze sobą, bo interferencja pomiędzy różnymi fotonami w ogóle nigdy nie zachodzi. To nie do końca prawda, ale akurat w naszym eksperymencie sytuacja tak właśnie wygląda. Czyli interferencję silnego strumienia światła możemy zazwyczaj rozumieć tak, że każdy foton wchodzący w skład wiązki przechodzi dwiema szczelinami równocześnie, a następnie interferuje sam ze sobą. No cóż, chyba nie spodziewaliśmy się po mechanice kwantowej niczego zjadliwego?

†††

Eksperyment Younga sprawia, że aż ręce świerzbią, żeby sprawdzić, k t ó r ę d y podróżuje pojedynczy foton. Kiedy jednak za którąkolwiek ze szczelin po prostu bezczelnie wstawimy detektor, obraz interferencyjny przepadnie i zamiast niego statystyka położeń fotonu na ekranie zmieni się w pojedynczą plamę umieszczoną za otwartą szczeliną. A gdyby tak podejrzeć foton tylko t r o c h ę? Okazuje się, że da się to zrobić. Wystarczy za jedną ze szczelin umieścić płytkę półprzepuszczalną, a na drodze odbitej wiązki umieścić detektor, jak przedstawia to rysunek poniżej. Tego typu układ pozwoli nam dowiedzieć się c z e g o ś o położeniu fotonu,

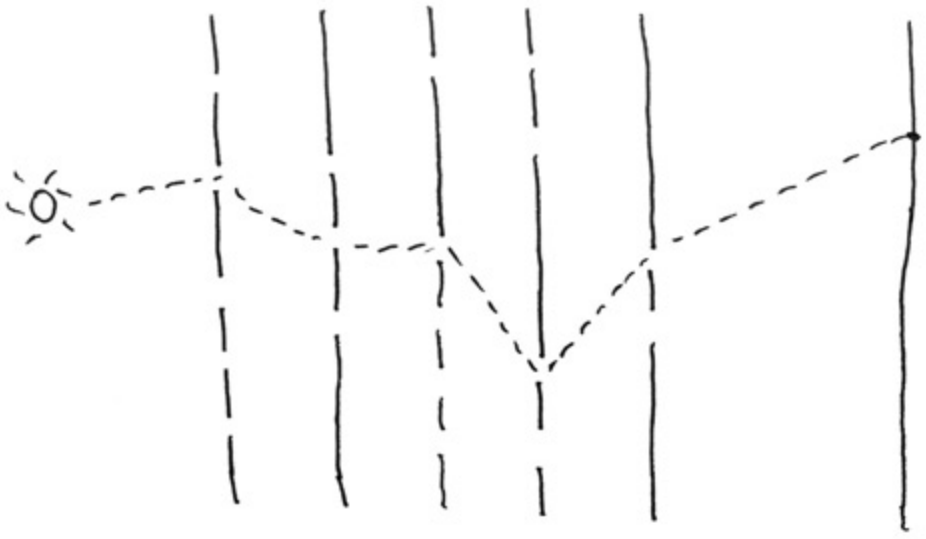
przynajmniej od czasu do czasu, kiedy akurat foton odbije się od płytki. A co stanie się wówczas ze statystyką interferencyjną?



Okaże się, że prążki nadal będą widoczne, ale ich kontrast się zmniejszy. Czyli prążki zanikną, ale tylko t r o c h ę. Kiedy zdobędziemy niepełną informację o tym, którędy podróżował foton, doprowadzi to do częściowego pogorszenia efektu interferencyjnego. Jeśli chcielibyśmy podglądać nasz foton nieco mniej inwazyjnie, wystarczyłoby zastąpić płytkę półprzepuszczalną szkłem, które przepuszcza na przykład 90% światła, a odbija tylko 10%. Okaże się wówczas, że co prawda zbierzemy statystycznie mniej informacji o położeniu fotonu, ale za to prążki interferencyjne staną się bardziej widoczne. Jest to również przykład ogólnej zasady: im dokładniej zbadamy położenie fotonu, tym słabiej będzie on interferował sam ze sobą. Czyli jak gdyby „mniej" był w dwóch miejscach naraz.

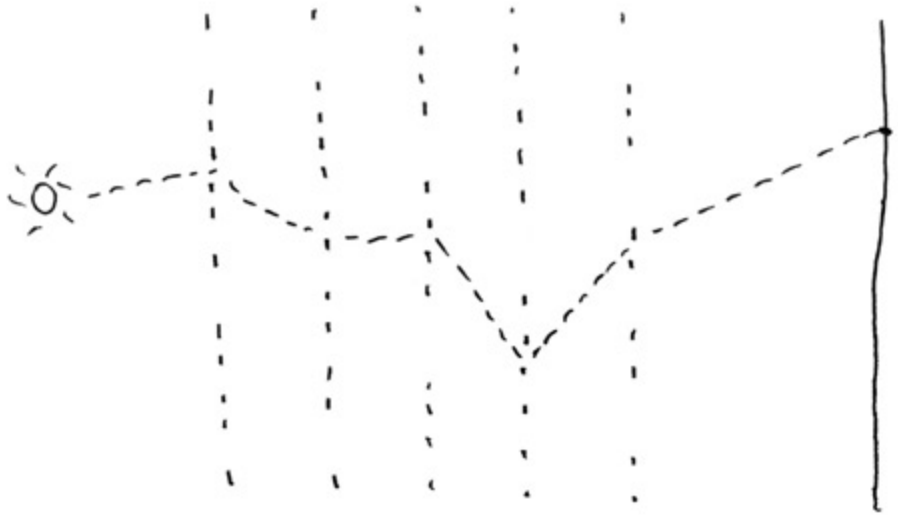
Nie ma co narzekać, przyroda jaka jest, każdy widzi. A jak niemiła księdzu ofiara, to chodź, cielę, do domu. Wynik eksperymentu Younga z podwójną szczeliną czytelnie ilustruje fundamentalne zasady mechaniki kwantowej. Jeśli nasz foton nie jest obserwowany, a mógłby ewoluować na kilka nierozróżnialnych sposobów, to r z e c z y w i ś c i e realizuje on wszystkie możliwości naraz.

A czy moglibyśmy zwiększyć liczbę możliwych dróg i zobaczyć, jak wpłynie to na zachowanie fotonu? Nasz zmodyfikowany eksperyment mógłby wyglądać tak, że wycięlibyśmy w przegrodzie nie dwie, lecz pięć szczelin. Jaki będzie efekt? Okaże się, że uzyskany na ekranie obraz interferencyjny ulegnie zmianie. Będzie on teraz wyglądał tak, jak gdyby foton podróżował nie dwiema, lecz wszystkimi pięcioma drogami równocześnie. Liczbę szczelin można zwiększać do woli. Można też pójść jeszcze dalej, umieszczając za pierwszą przegrodą – kolejną, z kilkoma innymi wyciętymi szczelinami. A za nią jeszcze jedną i jeszcze jedną. I tak dalej, aż nam się nie znudzi. Schemat takiego eksperymentu przedstawia rysunek poniżej.



Cóż takiego zaobserwujemy na ekranie? Obraz będzie bardzo skomplikowany. Pojawią się prążki porozrzucane na ekranie dość chaotycznie i trudno będzie dostrzec jakąkolwiek prawidłowość. Jednak drobiazgowa analiza ujawni, że obraz na ekranie będzie dokładnie taki, jak gdyby nasza wiązka podróżowała absolutnie k a ż d ą drogą równocześnie. Jedną z takich dróg zaznaczyłem na rysunku przerywaną linią, ale łatwo stwierdzić, że możliwych dróg jest dużo więcej. Konkretnie w narysowanym przykładzie będzie ich 600 i wszystkie one będą ze sobą interferować.

A teraz najlepsze. Wyobraźmy sobie, że zwiększamy liczbę przegród i wycinamy w nich coraz więcej i więcej szczelin. Jeśli proces ten będziemy kontynuować, wówczas z każdej przegrody prędzej czy później wytniemy tyle, że prawie n i c z niej nie pozostanie, jak pokazuje rysunek.



Gdy wreszcie usuniemy wszystkie przegrody i światło będzie bez przeszkód podróżować od źródła do ekranu, będzie to robić wzdłuż najzwyklejszej linii prostej! Jednak z a n i m osiągniemy tę graniczną sytuację, będziemy mieć do czynienia ze scenariuszem,

w którym światło porusza się ogromną liczbą bardzo skomplikowanych, interferujących ze sobą dróg.

Czyżby zatem klasyczny obraz malowany przez *optykę geometryczną*, w której wiązka światła porusza się zawsze wzdłuż pojedynczej, najkrótszej drogi, był efektem bardzo skomplikowanej interferencji? Najwyraźniej! Światło porusza się wszystkimi możliwymi drogami, nawet najbardziej skomplikowanymi, lecz w wyniku nakładania się ogromnej liczby fal, większość z nich nawzajem się pozjada, a pozostanie tylko jedna, najprostsza trajektoria.

Tak właśnie zachowuje się światło. Ale nie tylko ono. Podobnie zachowują się też elektrony, protony i inne mikroskopijne cząstki. Prawo to dotyczy wszystkich znanych cząstek elementarnych – one też interferują same z sobą.

A co dzieje się ze zwykłymi przedmiotami, z którymi mamy do czynienia na co dzień? Na jakim poziomie prawa kwantowe się załamują? Czy układ złożony z pięciu cząstek jest wciąż kwantowy? A z dziesięciu? Okazuje się, że eksperyment Younga można powtórzyć nawet z cząsteczkami *fulerenów* liczących sześćdziesiąt atomów węgla, a prążki interferencyjne nadal są widoczne. Nie jest to zresztą rekord. Największym znanym obiektem fizycznym zachowującym się w sposób jawnie kwantowy jest tak zwany *kondensat Bosego-Einsteina,* czyli mała chmurka złożona nawet z wielu milionów atomów schłodzonych do temperatury wynoszącej zaledwie jedną milionową stopnia powyżej zera absolutnego. Tego typu obiekt widać gołym okiem. Można w nim dostrzec kwantowe prążki interferencyjne. Wiele milionów atomów zachowujących się czysto kwantowo! To jeszcze nie koniec. Od pewnego czasu różne grupy doświadczalne

przymierzają się do interferowania na podwójnej szczelinie pojedynczych w i r u s ó w! To byłoby coś.

Ale nawet światło składające się z miliona bilionów fotonów także interferuje, czego efekty można zaobserwować gołym okiem. Wystarczy zbliżyć do siebie kciuk i palec wskazujący, zamknąć jedno oko i spojrzeć przez szczelinę między palcami na zapaloną lampę. Zaobserwujemy wówczas ciekawy efekt: palce będą wyglądać tak, jakby się ze sobą sklejały, jeszcze z a n i m je złączymy. Jeśli przyjrzymy się uważnie, dostrzeżemy prążki interferencyjne.

†††

Te i inne znane przykłady pokazują, że prawa kwantowe stosują się także do obiektów o sporych rozmiarach. A skoro tak, to nie tylko światło posiada naturę falową. Podobny charakter muszą mieć wszystkie interferujące obiekty, także elektrony, fulereny i kondensaty Bosego-Einsteina. Pytanie, co takiego „faluje" w przypadku fulerenów, skoro są to całkiem skomplikowane struktury, nie jest wcale takie proste. W zamierzchłych czasach używano pojęcia *fale materii*. Obecnie mówi się o *falach* lub *amplitudach prawdopodobieństwa*. Są to jednak wyłącznie nazwy. A nazwy niczego nie wyjaśniają. Jeśli jakiemuś zjawisku nadamy mądrze brzmiącą nazwę, to przecież ani na krok nie zbliża nas to do z r o z u m i e n i a tego zjawiska. Na tym etapie rozumienia rzeczywistości, na którym znajduje się współczesna fizyka, są to pojęcia fundamentalne, czyli niewyjaśnialne w jakikolwiek istotnie głębszy sposób. Znamy mechanizmy działania świata, odkrywamy reguły gry, którym podlega klatka na ludzi, ale c z y m ona jest

i d l a c z e g o owe reguły są takie, a nie inne, wciąż nie mamy pojęcia.

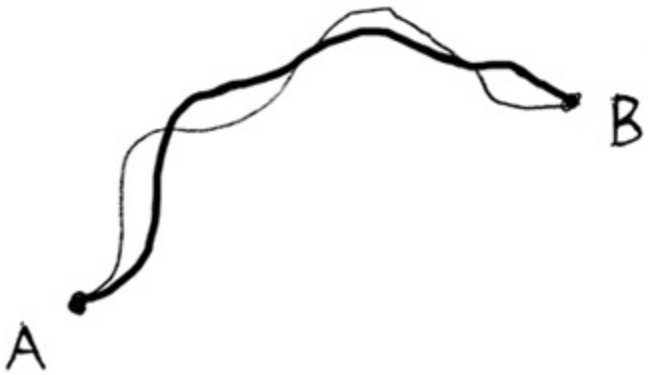
Granica stosowalności praw kwantowych w ogóle nie jest znana. Może nawet nie ma jej w ogóle. Wydaje się przecież, że prawa te obowiązują także w świecie makroskopowym, dotyczą więc nawet nas samych. Istnieje wiele hipotez na temat tego, dlaczego nie obserwujemy wszystkich dziwnych zjawisk kwantowych na co dzień, a nasz świat wydaje się w pełni deterministyczny i całkiem „zwyczajny". Niektóre z tych hipotez jeszcze weźmiemy na tapetę, trzeba jednak przyznać, że sytuacja nie jest do końca jasna i temat ten, po stu latach od odkrycia teorii kwantowej, jest wciąż przedmiotem kontrowersji i otwartej debaty. Póki co, musimy więc obejść się smakiem.

†††

A skoro mowa o jedzeniu, powróćmy do jajka, którym rzucaliśmy myślowo w nielubianego filozofa. Zauważyliśmy wówczas, że swobodny ruch lecącego jajka odbywa się po bardzo szczególnej drodze. Takiej mianowicie, na której jajko zestarzeje się n a j b a r d z i e j spośród wszystkich możliwych dróg prowadzących do celu. Dziwiło nas, skąd niemądre jajko wie, jak wybrać tę szczególną drogę. Czy może jest to po prostu przypadek? Wiele wskazuje, że wcale nie, a jajko naprawdę „wie". Zgodnie z obrazem malowanym przez mechanikę kwantową, nie tylko elektron, ale każdy inny obiekt porusza się po wszystkich możliwych drogach jednocześnie, a w wyniku interferencji odpowiadających im fal większość wzajemnie się wygasza, a wyłania się tylko jedna, szczególna trajektoria. A więc w pewnym

sensie lecące jajko rzeczywiście „wącha” wszystkie możliwe drogi. A nie tylko my wąchamy jajko.

Dlaczego spośród wszystkich kasujących się trajektorii zostaje akurat ta, dla której czas starzenia jest maksymalny? Aby to zrozumieć, wyobraźmy sobie dwa odległe punkty *A* i *B*, połączone pewną dowolną drogą zaznaczoną na poniższym rysunku grubą linią. Jest to jedna z dróg, którą mógłby poruszać się elektron (albo jajko), a fala z nim związana przed dotarciem do celu zdążyłaby wykonać sporą liczbę drgań. Jednakże elektron może poruszać się także wieloma innymi drogami pomiędzy *A* i *B*. Na przykład tuż obok znajduje się inna, możliwa droga, lecz odrobinę dłuższa, jak przedstawia to cienka linia na rysunku. Podróż nią trwałaby nieco dłużej, a zatem fala związana z elektronem zdążyłaby wykonać nieco większą liczbę drgań przed dotarciem do *B*.




Cienka linia może być przez nas wybrana w taki sposób, aby górki podróżującej nią fali trafiły na dołki fali podróżującej wzdłuż grubej linii. Wystarczy, że różnica długości dróg będzie odpowiednia. Czyli obok każdej drogi znajdzie się zawsze inna, która doprowadzi do wzajemnego wygaszenia obydwu fal. Dlatego właśnie większość fal podróżujących dziwacznymi drogami kompletnie przepadnie, interferując destruktywnie z innymi,

pobliskimi falami. Z tego powodu owych fikuśnych dróg wcale nie zaobserwujemy. Interferencję „przeżyją” tylko te fale, które będą się wzajemnie wzmacniać, a nie osłabiać.

I okazuje się, że istnieje taka droga między punktami *A* i *B*, która zamiast wygaszać się z pobliskimi falami, będzie się z nimi wzmacniać. Jest to droga o m a k s y m a l n y m czasie starzenia. W jej pobliżu nie ma żadnej sąsiedniej trajektorii, która odpowiadałaby dłuższemu czasowi przelotu. No bo przecież to ona odpowiada czasowi maksymalnemu spośród w s z y s t k i c h dróg! A zatem żadna pobliska droga nie będzie mogła być dłuższa, czyli nie doprowadzi do destruktywnej interferencji. Wszystkie sąsiednie drogi będą bowiem niemal tej samej długości (podróż nimi będzie trwać tylko trochę krócej, ale różnica będzie bardzo niewielka). Interferencja z pobliskimi drogami będzie więc prowadzić jedynie do wzajemnego wzmacniania podróżujących nimi fal.

Sytuacja przypomina wspinanie się na górski szczyt. Gdy wchodzimy po stromym zboczu, każdy krok powoduje, że znajdujemy się nieco wyżej. Jednak na samym szczycie, gdy osiągnęliśmy maksymalną wysokość, wykonanie kroku w którymkolwiek kierunku nie podnosi nas ani nie opuszcza niemal wcale, bo szczyty są zazwyczaj dość płaskie, a nie spiczaste. Punkty tuż obok szczytu leżą na niemal tej samej wysokości, co sam szczyt. Z tego samego powodu trajektorie znajdujące się tuż obok tej o największym czasie starzenia charakteryzują się czasem niemal równie długim. Oznacza to, że sąsiednie fale będą się wzajemnie wzmacniać. I dlatego w wyniku interferencji elektronu z samym sobą uzyskamy efekt wyglądający tak, jak gdyby poruszał się on jedynie wzdłuż trajektorii o maksymalnym czasie starzenia. Wszystkie inne drogi sromotnie przepadną w destruktywnej

interferencji. Dokładnie tak samo jak z elektronem jest z każdym innym ciałem, także z jajkiem.

Rozumowanie to dostarcza sugestywnego argumentu za tym, że prawa kwantowe stosują się r ó w n i e ż do obiektów makroskopowych. Takich jak latające jajko albo spadający filozof. Prawa kwantowe wyjaśniają bowiem, jak to możliwe, że wszystkie te poruszające się swobodnie ciała zawsze „wybierają" trajektorię o maksymalnym czasie starzenia. Cena, którą trzeba zapłacić za takie wyjaśnienie, może być dla niektórych trudna do przełknięcia. No bo musimy przyjąć, że k a ż d e ciało porusza się tak, jak cząstki kwantowe: wszystkimi możliwymi drogami naraz. I tylko interferencja sprawia, że większości tych trajektorii nie dostrzegamy na co dzień.

Patrząc na rzeczywistość w ten sposób, można też elegancko uzasadnić, dlaczego „rozmycie" położenia ciał w świecie kwantowym wydaje się dużo większe niż w świecie makroskopowym, w którym ciała wydają się mieć precyzyjnie określone położenia.

W świecie kwantowym typowe skale odległości są mikroskopijne. Elektron orbitujący wokół jądra atomu porusza się wewnątrz obszaru mniejszego niż jedna dziesięciomiliardowa metra. Na tak niewielkich skalach przebycie typowej drogi z *A* do *B* wymaga bardzo niewielkiej liczby drgań fali elektronu. A zatem niemal wszystkim sąsiednim trajektoriom odpowiadać będzie zbliżona liczba drgań. To oznacza, że nie tylko fale leżące tuż obok siebie będą się wzmacniać, lecz fale leżące nieco dalej również. Czyli drogi wzajemnie się wzmacniające będą pokrywać względnie spory obszar, dzięki czemu będzie się wydawać, że trasa, wzdłuż której porusza się elektron, nie jest cieniutką linią, lecz pewnym poszerzonym obszarem. Więc elektron będzie sprawiać wrażenie

b a r d z i e j „rozmytego w przestrzeni” niż przeogromne w porównaniu z nim jajko.

Klasyczne pojęcia, takie jak położenie, po prostu zatracają w mikroświecie swój ortodoksyjny sens. Skoro nie ma sensu pojęcie położenia cząstki, nie da się zazwyczaj również mówić o jej prędkości, pędzie ani energii. I tak dalej. Wszystkie te wielkości stają się w podobny, kwantowy sposób niekreślone, czyli „rozmyte”. Dopóki obserwator nie wykona pomiaru, istnienie położenia, pędu czy jakiejkolwiek innej fizycznej wielkości jest w pewnym sensie jedynie naszym p r z e s ą d e m.

Rozważając jakiś czas temu względność równoczesności, zastanawialiśmy się, co było pierwsze: jajko czy kura? W świecie kwantowym pojedyncza cząstka „staje się” dopiero wtedy, gdy zostaje zmierzona przez obserwatora, mimo że obserwator sam składa się z takich samych cząstek. Można by więc zapytać, co było pierwsze: cząstka czy obserwator?

## ROZDZIAŁ DZIEWIĄTY

# *fizyka będzie skończona za pół roku*

*PRZEWIDYWANIE JEST BARDZO TRUDNE, a szczególnie przewidywanie przyszłości* – powiedział Niels Bohr. Bohr był bramkarzem w jednej z duńskich drużyn piłkarskich, ale również noblistą i jednym z twórców teorii kwantowej, która przewiduje, że przewidzieć przyszłości w ogólności się nie da. Jak wspomniałem, Bohr mawiał często, że *jeśli ktoś nie jest zszokowany mechaniką kwantową, to zapewne jej nie zrozumiał.* Jest w tym sporo prawdy. Uczucie szoku nie zasiedliłoby naszych mózgów, gdybyśmy niczego sobie nie u ś w i a d o m i l i. Za każdym razem, gdy wykładam mechanikę kwantową, uważnie obserwuję reakcje studentów i pilnuję, by pojawił się u nich opór przed tym, co próbuję im przekazać, bo jego obecność oznacza, że się rozumiemy.

Wracając do słów Bohra, wybieganie myślą w przyszłość rzeczywiście nie jest łatwe. Nawet wypełzanie w nią sprawia wielki trud. Znalazł się jednak człowiek, który w tej dyscyplinie błysnął geniuszem. Był to William Hamilton, o którym mówiono, że przed ukończeniem 13. roku życia znał więcej języków, niż miał lat. Hamilton, który żył w XIX wieku, zwrócił uwagę na to, że ruch ciał poruszających się zgodnie z prawami Newtona jest bardzo osobliwy. To znaczy ciała poruszają się po bardzo szczególnych drogach, trochę jak jajko, o którym mówiliśmy wcześniej.

I próbował zrozumieć, dlaczego tak się dzieje. W tych czasach wiadomo było już, że światło porusza się zawsze najkrótszymi, czyli również bardzo szczególnymi drogami. Hamilton zaczął podejrzewać, że materia i światło muszą więc być do siebie podobne. Udało mu się wykazać głęboki związek pomiędzy prawami ruchu materii a zasadami rządzącymi rozchodzeniem się światła. To z kolei skłoniło go to do podejrzeń, że materia, podobnie jak światło, musi mieć naturę... falową! I pewien tajemniczy efekt interferencyjny musi być odpowiedzialny za szczególny wybór dróg, wzdłuż których poruszają się wszystkie ciała.

O tym, że Hamilton się nie mylił, świat przekonał się dopiero kilkadziesiąt lat później, już po jego śmierci, wraz z rozkwitem mechaniki kwantowej. Zawdzięczamy to pracom Schroedingera, De Broglie'a, Diraca i Feynmana. W tym sensie mechanika kwantowa powinna być teorią bardziej przekonującą od teorii newtonowskiej. Wyjaśnia ona przecież zadziwiającą właściwość ruchu cząstek, która wcześniej pozostawała niezrozumiała.

A jednak, gdyby nie jednoznaczny materiał dowodowy, nikt nie uwierzyłby ani w mechanikę kwantową, ani w teorię względności. Gdyby nie jednoznaczny materiał dowodowy, nikt nie uwierzyłby też w kulistość Ziemi. Do odkrycia go potrzebne było zwątpienie w powszechne kiedyś tezy o tym, że płaska Ziemia podtrzymywana jest przez ogromnego żółwia. Uczeń Bohra, Werner Heisenberg, również noblista, podsumował swoje doświadczenia badawcze następująco:

*Nie dość, że wszechświat jest dziwniejszy, niż*
*myślimy, to jest dziwniejszy, niż potrafimy myśleć.*

Nic dziwnego, że wiara oparta na naszych naiwnych oczekiwaniach wywołuje szok w zderzeniu z rzeczywistością. Obraz

świata, w który zazwyczaj wierzymy, jest bowiem kompletnie prostopadły do rzeczywistości.

†††

Ciekawa była postawa Einsteina, jednego z największych rewolucjonistów naukowych wszech czasów, w stosunku do mechaniki kwantowej. Jego niechęć do teorii kwantowej była wręcz legendarna. Einstein był twórcą słynnego aforyzmu:

*Najbardziej niezrozumiałą cechą wszechświata*
*jest to, że może on być zrozumiany.*

Kiedy jednak wyszło na jaw, że wynik pojedynczego pomiaru kwantowego jest fundamentalnie n i e w y j a ś n i a l n y, Einstein okazał się tym wielce zaskoczony. Czyżby zatem sam niezbyt poważnie traktował swój własny aforyzm, zgodnie z którym niezrozumiałości wszechświata należałoby wręcz oczekiwać? Einstein do śmierci nie zdołał pogodzić się z wnioskami płynącymi z eksperymentów z pojedynczymi cząstkami. Postawa ta mocno kontrastowała z brutalnym stwierdzeniem Richarda Feynmana, współtwórcy *elektrodynamiki kwantowej*:

*Nieważne, jak piękna jest twoja teoria, nieważne,*
*jak bystry z ciebie gość. Jeśli twoja teoria*
*przeczy eksperymentowi – jest błędna.*

Należy więc uczciwie przyznać, że pod koniec XIX wieku naukowcy nieco się chyba zapomnieli, jeśli chodzi o pielęgnowanie zdrowego zwątpienia w swoją wiedzę o świecie. Max Planck,

od którego rozpoczęła się cała kwantowa rewolucja, tak wspominał czasy swej młodości:

*Kiedy rozpoczynałem studia fizyczne (w 1880 roku) i u mego czcigodnego nauczyciela Philippa von Jolly'ego zasięgałem opinii na temat warunków i perspektyw moich studiów, przedstawił mi on fizykę jako naukę wysoko rozwiniętą, prawie całkowicie dojrzałą, która po ukoronowaniu jej osiągnięć dzięki odkryciu zasady zachowania energii miała już wkrótce przyjąć ostateczną postać. Wprawdzie w tym czy innym zakątku pozostaje jeszcze do zbadania i usunięcia jakiś pyłek czy pęcherzyk, ale jeśli chodzi o system jako całość, to jest on dość zabezpieczony, a fizyka teoretyczna wyraźnie zbliża się do osiągnięcia takiej doskonałości, jaka od stuleci jest właściwa geometrii.*

Przekonanie o tym, że świat jest już niemal całkowicie zrozumiany, było powszechne wśród wielu najwybitniejszych uczonych tych czasów. Nieźle wyraził to Albert Michelson, noblista polskiego pochodzenia, który zasłynął wykonaniem eksperymentu pokazującego, że prędkość światła jest stała. Najprawdopodobniej to ten eksperyment naprowadził Einsteina na odkrycie rewolucyjnej teorii względności w 1905 roku (choć Einstein nigdy tego nie przyznał). Jednak zaledwie 6 lat wcześniej (w 1899 roku) Michelson powiedział:

*Wszystkie najważniejsze fundamentalne prawa*
*i fakty w fizyce zostały już odkryte i tak dobrze*
*ustalone, iż jest znikome prawdopodobieństwo, że*
*zostaną one uzupełnione w wyniku nowych odkryć.*

Ta skrajna krótkowzroczność została dotkliwie skompromitowana przez odkrycia, które nastąpiły tuż potem. Można by zatem podejrzewać, że nikt rozsądny jeszcze długo nie będzie dzielić się refleksjami tego kalibru. A gdzie tam. Noblista Max Born, który jako pierwszy wysunął tezę, że świat kwantowy nie jest deterministyczny, wynurzył przed światem następującą złotą myśl:

*Fizyka będzie skończona za pół roku.*

Było to w 1928 roku. 50 lat później, w 1980 roku, astrofizyk Stephen Hawking wysunął podobne przypuszczenie:

*Cel fizyki teoretycznej zostanie osiągnięty*
*w niezbyt odległej przyszłości, powiedzmy*
*do końca naszego wieku.*

Hawking czerpał przyjemność z porównywania się do najwybitniejszego fizyka wszech czasów, Izaaka Newtona. Wychodząc naprzeciw tej potrzebie, przywołajmy słowa Newtona, wypowiedziane na długo przed odkryciem teorii względności i teorii kwantowej, które miały dostarczyć naukowcom cennej lekcji pokory:

*Sądzę, że jestem jedynie dzieckiem bawiącym*
*się na plaży, podczas gdy przepastny ocean*
*prawdy leży przede mną nieodkryty.*

Pokolenie naukowców będących świadkami odkrywania teorii kwantowej zestarzało się i wymarło. W ich miejsce pojawiły się kolejne tabuny fizyków, w których głowy od małości sączono nowy, kwantowy paradygmat rzeczywistości. Nie powinno nas zatem dziwić, że proporcje pomiędzy zwolennikami

a przeciwnikami teorii kwantowej uległy radykalnemu przesunięciu na korzyść zwolenników. Być może dowody eksperymentalne stały się bardziej przekonujące. A może nowemu pokoleniu było po prostu łatwiej, bo nie miało ono wbitego do głów zdezaktualizowanego opisu świata. Einstein twierdził, że:

*zdrowy rozsądek to zbiór przesądów, których*
*nabieramy przed 16. rokiem życia.*

Warto więc pielęgnować spostrzeżenie Richarda Feynmana:

*Nauka to wiara w ignorancję ekspertów.*

I jest to jedyna wiara, która w dążeniu do zrozumienia rzeczywistości powinna nas zaprzątać, każda inna jedynie nas zaśmieca.

†††

Jednym z najbardziej niepokojących aspektów mechaniki kwantowej jest zjawisko superpozycji. Mówiłem co nieco o pojedynczym fotonie podróżującym jednocześnie dwiema drogami wewnątrz interferometru. Możemy symbolicznie zapisać stan, w jakim znalazł się taki foton, jako sumę dwóch pozornie wykluczających się alternatyw (taką śmiesznawą notację stosuje się w mechanice kwantowej):

$$|\text{foton przeszedł górą}\rangle + |\text{foton przeszedł dołem}\rangle.$$

W większości realnych sytuacji każda cząstka jest jednak nie tylko w dwóch, lecz w nieskończenie wielu miejscach naraz,

co efektywnie wygląda nieco tak, jak gdyby cząstka była po prostu r o z m y t a w przestrzeni. Mechanika kwantowa pozwala wyznaczyć jedynie prawdopodobieństwo znalezienia jej w określonym miejscu. Superpozycja kwantowa może jednak mieć również zupełnie inny charakter i dotyczyć pozostałych aspektów zachowania cząstek. Pojedynczy foton może mieć na przykład nie jeden konkretny kolor, lecz posiadać kilka r ó ż n y c h kolorów równocześnie:

$$|\text{foton jest czerwony}\rangle + |\text{foton jest zielony}\rangle.$$

Ten przypadek może akurat nie być aż tak szokujący, szczególnie dla daltonistów, jednak okazuje się, że w zasadzie każdy foton posiada nie jeden, lecz całe spektrum kolorów naraz. Spektrum to określa, jakie jest prawdopodobieństwo zmierzenia fotonu o określonym kolorze, a zatem o określonej energii. Zjawisko superpozycji jest więc w świecie kwantowym czymś niezwykle powszechnym, wręcz pospolitym.

Na interesujący aspekt tego zagadnienia zwrócił uwagę Albert Einstein. Wyobraźmy sobie, że pewne źródło światła emituje parę fotonów: czerwony i zielony, z których jeden leci w lewo, a drugi w prawo. Mamy zatem dwie możliwości: albo czerwony foton poleciał w lewo, a zielony w prawo, albo odwrotnie. Jednakże mechanika kwantowa dopuszcza także istnienie superpozycji tych dwóch alternatyw. W takim przypadku mielibyśmy do czynienia z następującym *stanem kwantowym* pary fotonów (stan kwantowy to pełna charakterystyka obiektu kwantowego):

$$|\text{czerwony w lewo, zielony w prawo}\rangle + |\text{czerwony w prawo, zielony w lewo}\rangle\,.$$

Zgodnie z dogmatami teorii kwantowej, oba powyższe scenariusze rozgrywają się równocześnie i póki nie zostanie wykonany pomiar, kolory fotonów pozostają fundamentalnie nieokreślone.

Wyobraźmy sobie, że pozwoliliśmy naszym fotonom odlecieć dość daleko od siebie, na przykład w dwa odległe końce Układu Słonecznego, gdzie będą czekać na nie specjalne detektory mierzące kolory padających fotonów. Wiemy, że gdy jeden detektor zmierzy foton czerwony, drugi m u s i zmierzyć foton zielony. I odwrotnie. Przy wielu powtórzeniach eksperymentu wynik będzie pojawiać się w sposób losowy, jednak n i g d y nie dojdzie do sytuacji, w której oba złapane fotony będą jednakowego koloru. Ale zwróćmy uwagę, że tuż przed dokonaniem pomiaru jego wynik był fundamentalnie nieokreślony. Nic nie determinowało koloru fotonu, który trafi do danego detektora. A jednak wykonując pomiar na pierwszym fotonie, o d r a z u dowiadujemy się, jaki będzie wynik odległego pomiaru, niejako go dookreślając. Natychmiastowo, na odległość. Einsteinowi bardzo się taki obraz sytuacji nie uśmiechał. Wiedział, czym to pachnie. W końcu z jego własnej teorii względności wynikało, że przekazywanie informacji z nadświetlną prędkością prowadziłoby do poważnych kłopotów z opisem świata.

Podobną sytuację można stworzyć, ściągając z nóg buty i jeden rzucając w lewo, a drugi w prawo. Jeśli nie spojrzymy, który but poleciał w którą stronę, a chcielibyśmy się tego dowiedzieć, należałoby udać się w stronę jednego z butów i spojrzeć na niego, czyli wykonać swoisty „pomiar". Oczywiście nie ma konieczności mierzenia także drugiego buta. Jeśli po jednej stronie leży lewy, oznacza to, że po przeciwległej stronie m u s i znajdować się prawy. I odwrotnie.

Tylko że zgodnie z tezami mechaniki kwantowej sytuacja, z którą mamy do czynienia w przypadku butów, jest skrajnie odmienna od scenariusza z parą fotonów. W przypadku butów ich „skrętność" określona jest od samego początku, już w momencie rzucania. Co najwyżej, mogliśmy nie zauważyć, który but leciał w którą stronę. W przypadku fotonów zaś sytuacja jest d i a m e t r a l n i e inna. Ich stan po prostu jest fundamentalnie nieokreślony i w c a l e nie wynika to z naszej niepełnej wiedzy o układzie doświadczalnym.

W czasach studenckich zostałem zaproszony do Oksfordu, do współpracy przy pewnym projekcie badawczym związanym z dziwnym zachowaniem takich fotonów. Po dotarciu na miejsce okazało się, że mam problem z moimi własnymi butami. Dość niefortunnie wykoślawiłem je w podróży i czułem się w nich jak kaczka. Płaskostopie, którego byłem nosicielem, prowadziło do tego, że wykoślawiałem wtedy do wewnątrz wszystkie swoje buty. Była to wyłącznie kwestia czasu, choć zazwyczaj trwało to nieco dłużej niż tym razem. Utrzymywałem się wtedy wyłącznie ze stypendium naukowego i uczenia innych studentów lub okazjonalnego pisania za ludzi matur, więc nie było mnie stać na kupienie sobie nowej pary, a nie wziąłem ze sobą żadnej innej. Perspektywa powrotu do Polski była dość odległa, bo przecież dopiero co dotarłem na miejsce.

Człapałem więc w swoich wykoślawionych butach przez Oksford, niosąc ciężki plecak i szukając w myślach jakiegoś rozwiązania kłopotliwej sytuacji. Olśnienie przyszło nagle. Zatrzymałem się, usiadłem na krawężniku, zdjąłem buty i założyłem je ponownie, ale na odwrót: prawy na lewą nogę, a lewy na prawą. Wstałem, żeby sprawdzić, jak się chodzi. Było całkiem nieźle, bo teraz buty były wykoślawione n a z e w n ą t r z, a nie do środka, więc moje

płaskostopie idealnie to kompensowało. W ten sposób chodziłem kilka dni i nikt niczego nie zauważył. A nawet jeśli zauważył, to nic nie powiedział, więc na jedno wychodziło. Gdy buty nieco się naprostowały, zacząłem nosić je w sposób losowy, aż do powrotu do Polski.

Mogło to wyglądać dość ekscentrycznie, ale moja motywacja była przecież całkowicie racjonalna. W konsekwencji nigdy jednak nie pamiętałem, na której nodze noszę lewy, a na której prawy but. Zupełnie jak w zagadnieniu z parą fotonów. Lecz w przypadku moich butów nie była to fundamentalna nieokreśloność. Po prostu nie zwracałem uwagi na szczegóły.

Jeśli zaś nasze rozumienie podstaw rzeczywistości jest właściwe, to ani w przypadku fotonów z naszego wcześniejszego przykładu, ani jakichkolwiek innych cząstek szczegóły te po prostu n i e i s t n i e j ą. Żaden aspekt rzeczywistości nie niesie informacji o tym, czy czerwony foton poleciał w lewo, a zielony w prawo, czy też odwrotnie. Scenariusze te rozgrywają się r ó w n o c z e ś n i e. Co ciekawe, nie prowadzi to wcale do możliwości natychmiastowego przesyłania informacji, więc konflikt z teorią względności jest tylko pozorny.

†††

W latach dwudziestych i trzydziestych XX wieku i jeszcze długo potem dyskusja na temat kwantowo-mechanicznej wizji świata toczyła się w najlepsze. Po jednej stronie stał Niels Bohr, przewodząc doktrynie, zgodnie z którą fundamentalne aspekty rzeczywistości pozostają nieokreślone aż do momentu wykonania pomiaru, kiedy to w sposób spontaniczny objawia się losowy wynik. Po drugiej zaś stali zwolennicy klasycznej wizji

rzeczywistości, z Albertem Einsteinem na czele, według których „Bóg nie gra w kości". Gdybym miał zgadywać, co o owej debacie myśleć będą studenci fizyki za tysiąc lat, obstawiałbym, że według nich cała ta dyskusja będzie się wydawać skrajnie naiwna. Trochę jak kłótnia pomiędzy plemionami cieni na temat pisowni słowa „zrzynać". Albo „zżynać". Z całą pewnością realistyczna, deterministyczna wizja świata j e s t skrajnie naiwna (choćby dlatego, że wydaje nam się sensowna, a gdy coś wydaje się nam sensowne, to raczej nie może być prawdziwe), ale nie znaczy to, że za sprawą mechaniki kwantowej ostatnie słowo w tej sprawie zostało już powiedziane.

Tymczasem od czasu śmierci Einsteina sytuacja na tym froncie uległa znaczącej zmianie. Stało się to za sprawą pracy Johna Bella, która zrewolucjonizowała sposób patrzenia na fundamentalne zagadnienia mechaniki kwantowej. Bell znalazł metodę doświadczalnego odróżnienia dwóch możliwych scenariuszy. Pierwszego, w którym rzeczywistość jest deterministyczna, lecz nie mając pełnego dostępu do informacji zakodowanych w mikroświecie, odnosimy w r a ż e n i e, że zachowuje się on w sposób losowy. I drugiego scenariusza, zgodnie z którym deterministyczna rzeczywistość, którą wyobrażaliśmy sobie w ramach klasycznej fizyki, po prostu n i e i s t n i e j e w takiej formie, jakiej życzyłby sobie Albert Einstein. Bellowi udało się wymyślić chytry schemat eksperymentalny pozwalający na weryfikację, z którym scenariuszem mamy w rzeczywistości do czynienia. Schemat ten oparty jest na dość prostych matematycznych nierównościach, nazywanych *nierównościami Bella.*

Praca Bella ukazała się w 1964 roku, czyli 9 lat po śmierci Einsteina. Ale eksperyment, który zaproponował Bell, był wówczas

zbyt trudny do przeprowadzenia. Trzeba było odczekać 20 lat wypełnionych wytężoną pracą wielu fizyków, by wreszcie udało się zrealizować pierwszą, uproszczoną wersję testu Bella. Od tego czasu minęło kolejne 35 lat, a wykonywanie eksperymentów testujących nierówności Bella stało się niemal rutynową praktyką laboratoriów doświadczalnych.

Nawet ja, mimo że jestem fizykiem-teoretykiem (fizycy lubią dzielić się na teoretyków i doświadczalników), wykonywałem kilkanaście lat temu prostą wersję jednego z takich eksperymentów. Aby go przeprowadzić, trzeba było wyprodukować w laboratorium tak zwane *stany splątane*, podobne do omawianego wcześniej stanu czerwono-zielonego:

$$|\text{czerwony w lewo, zielony w prawo}\rangle + |\text{czerwony w prawo, zielony w lewo}\rangle .$$

Mając je, pozostało już tylko wykonanie serii sprytnie pomyślanych pomiarów.

Jaki jest werdykt? Nie wygłupiałbym się, pisząc kilka rozdziałów o mechanice kwantowej, gdyby nie fakt, że wszystkie eksperymentalne testy nierówności Bella dały ten sam wynik: einsteinowska wizja świata okazuje się zbyt naiwna, by była prawdziwa. Nierówności Bella są łamane, tak jak przewiduje to mechanika kwantowa, a co nie byłoby możliwe w ramach klasycznego opisu przyrody. Nie ma co się dłużej oszukiwać: żyjemy w dziwnym świecie, który nijak nie przystaje do naiwnych, dziewiętnastowiecznych wyobrażeń. Zostaje nam tylko jeszcze raz powtórzyć ofertę Feynmana: *jak ci się nie podoba rzeczywistość, to sobie idź gdzie indziej.*

†††

Wspomniałem, że według mnie ostatnie słowo nie zostało w tej kwestii jeszcze powiedziane. Ale nie dlatego, że żywię nadzieję na przywrócenie deterministycznej wizji świata, znanej z czasów Newtona. Wręcz przeciwnie, jestem przekonany, że nowe odkrycia pokażą jedynie, że nieprzebrane pokłady rzeczywistości, do których jeszcze nie zaczęliśmy docierać, okażą się nieporównywalnie dziwniejsze, niż mówi to nawet teoria kwantowa. I być może kolejne pokolenia „einsteinów" będą wzbraniać się przed przyjęciem tego do wiadomości.

W przeciwieństwie do Maxa Borna czy Stephena Hawkinga podejrzewam, że dopiero zaczynamy się rozglądać wewnątrz klatki na ludzi, do której trafiliśmy. Wszelkie próby przewidywania, co jeszcze moglibyśmy w niej znaleźć, zapewne okażą się bardziej naiwne niż filmy *science fiction* sprzed pięćdziesięciu lat. Mówię to na podstawie prostej ekstrapolacji tego, z czym mieliśmy do czynienia w nauce przez ostatnie kilka wieków. W 1903 roku bracia Wright zdołali oderwać się od Ziemi wraz ze swym pokracznym aeroplanem. Kto mógł wówczas podejrzewać, że już 66 lat później pierwsza naga małpa zostanie dostarczona na Księżyc, na którym odciśnie ślady swoich odnóży?

Nie chodzi nawet o to, że odpowiedzi na pytania stawiane dotąd przez naukowców wkrótce okazywały się błędne. Chodzi o to, że pytania te okazywały się źle postawione. Całkiem niedawno średniowieczni scholastycy zastanawiali się, ile diabłów zmieści się na główce od szpilki albo na czym stoi żółw podtrzymujący Ziemię. Czy istnieje inna odpowiedź niż taka, że pytania te nie trzymają się kupy? Nawet postać tak wybitna, jak Izaak Newton, pytając, w którym miejscu upadnie piłka rzucona z prędkością *V*, pod kątem

$\alpha$, używał pojęć, takich jak „położenie” lub „prędkość”, które zatracają swój sens w świecie opisywanym przez mechanikę kwantową. O czym Newton nie mógł oczywiście mieć ani zielonego, ani nawet czerwonego pojęcia. Zastanawiam się czasem, jak wielkim szokiem dla tego genialnego człowieka musiałoby być poznanie stanu ludzkiej wiedzy jedynie po trzech stuleciach badań.

A co dopiero po trzech tysiącleciach? Albo po trzech milionach lub miliardach lat, podczas których życie wyewoluuje w formy, dla których nasze obecne mózgi będą niczym prymitywne organelle pierwotniaków? A sam akt „myślenia” będzie zapomnianym, przyziemnym procesem fizjologicznym, przyćmionym przez niewyobrażalne dla nas inne formy twórczej aktywności. No, ale może kompletnie się mylę, może wiemy już prawie wszystko, a fizyka rzeczywiście zostanie skończona za pół roku.

## ROZDZIAŁ DZIESIĄTY

# *komputery kwantowe, kryptografia i teleportacja*

*FIZYKA JEST JAK SEKS. Może prowadzić do praktycznych konsekwencji, ale nie dlatego to robimy.* Tak przynajmniej twierdził Richard Feynman, którego nie tylko za to stwierdzenie należy lubić. Że teoria względności czy mechanika kwantowa są zaskakujące, mieliśmy już okazję się przekonać. A co z ich praktycznymi konsekwencjami, są w ogóle jakieś? Teraz będzie właśnie o tym. Przypomnijmy sobie reakcję Faradaya zapytanego, na co komu prąd elektryczny? W najbardziej znanej wersji tej anegdoty odrzekł on, że *co prawda jeszcze nie wie, lecz zapewne wkrótce zostanie to opodatkowane.* Wedle mniej rozpowszechnionej wersji Faraday odpowiedział pytaniem: *a na co komu nowe dziecko?* W każdym razie prąd elektryczny, który dla swoich odkrywców był po prostu tajemnicą wartą rozwikłania, dla pozostałych przedstawicieli gatunku okazał się jednym z najpożyteczniejszych narzędzi wszech czasów. Gdyby fizycy nieco bardziej dbali o własne interesy, nie oddając nagiej małpie swoich odkryć za bezcen, obecni spadkobiercy Faradaya co środę lataliby rekreacyjnie na Marsa rakietą jednorazowego użytku wysadzaną diamentami.

Świat naukowy jest jednak zorganizowany na innych zasadach. Wyniki badań naukowych publikowane są w ogólnodostępnych czasopismach, a jeśli nawet dzięki odkrytej przez kogoś teorii, dajmy

na to teorii względności, skonstruowany zostanie system satelitarny GPS albo bomba atomowa, odkrywcy pozostanie jedynie osobista satysfakcja. Bądź zgryzota. I nie ma na świecie drugiego zawodu, którego przedstawiciele tak słabo dbaliby o własne interesy, przyczyniając się jednocześnie do nieporównywalnego z niczym rozwoju wszystkich pozostałych.

Dla porównania, wytwórnie muzyczne skrupulatnie dbają o to, by prawa „autorskie" do odtworzenia jakiejkolwiek piosenki obowiązywały aż kilkadziesiąt lat. Gwarantując sobie stały dopływ gotówki. Całkiem niedawno Facebook zakazał pewnemu muzykowi publikowania autorskiego wykonania utworu Jana Sebastiana Bacha, powołując się na prawo do „własności intelektualnej".

Posiadaczy owej własności może zaskoczyć to, że nie istnieje żaden fundamentalny powód, dla którego model biznesowy przemysłu muzycznego i świata naukowego nie miałby być zorganizowany w sposób odwrotny. W takim scenariuszu wytwory sztuki rozdawane byłyby za darmo, a ich autorzy utrzymywaliby się ze skromnej państwowej pensji, podczas gdy za korzystanie z owoców nauki skrupulatnie pobierane byłyby tłuste tantiemy. *Status quo* ilustruje jednak dość dobitnie, jakimi priorytetami kierują się naukowcy, a jakimi pozostali twórcy.

Mimo że głównym celem nauki jest rozgryzanie mechanizmów działania klatki na ludzi, to efekt uboczny nauki, czyli postęp technologiczny, jest doprawdy oszałamiający. Przynajmniej w porównaniu z postępem ludzkości generowanym przez inne niż nauka siły sprawcze. Wspomniałem o bombie atomowej i systemie satelitarnym GPS, które są konsekwencjami odkrytej przez Alberta Einsteina i innych teorii względności. Jedyne, czym kierowali się owi twórcy w swoich poszukiwaniach, to chęć rozwikłania

paradoksów elektromagnetyzmu, stanowiących przez kilkadziesiąt lat zagadkę ówczesnej nauki.

A jednak to właśnie odkrywcy teorii względności są współautorami sukcesu finansowego Google Maps. Bez poprawek przewidujących, jak dokładnie spowalnia upływ czasu w pobliżu Ziemi, system satelitarnego pozycjonowania myliłby się we wskazywaniu położenia naszych telefonów o kilkadziesiąt metrów. A zatem mapy satelitarne w naszych telefonach połączone z systemem GPS nie byłyby dla nas specjalnie pożyteczne. Zaskakujące i niewiarygodne właściwości pola grawitacyjnego, o których mowa była wcześniej, dają istotny wkład w nasze codzienne życie za każdym razem, gdy sprawdzamy telefonem, którędy nad jezioro.

†††

Świat w ogóle stoi na głowie. Będąc doktorantem, wybrałem sobie hobby, które miało odciążyć mnie intelektualnie: kupiłem tani aparat cyfrowy, zacząłem zaczepiać obcych ludzi na ulicy i pstrykać im zdjęcia. Trzy lata później wystawa tych zdjęć została wyświetlona w gigantycznym formacie na fasadzie Pałacu Kultury. Przyczyna była zapewne taka, że nie miałem pojęcia, jak należy fotografować, bo postawiłem na bycie samoukiem (podobno są tylko dwa rodzaje ludzi: samoucy i nieucy). W każdym razie mówiono mi, że robiłem wszystko inaczej niż reszta. Do tego, zamiast hobby, nieświadomie znalazłem sobie najlepiej płatny zawód na świecie. Bo za 1/125 sekundy fotografowania zaczęto mi płacić więcej niż za dwa lata pracy na uniwersytecie, co było skrajnym absurdem, przez który zacząłem spędzać więcej czasu w samolocie niż w domu.

Tego było już za wiele, ale na szczęście fotografia szybko mi się znudziła. W międzyczasie zdążyłem poznać więcej ciekawych ludzi niż zrobić zdjęć (których wykonałem najwyżej sto, z czego pokazałem może połowę). Zaintrygowało mnie jednak, że kilkadziesiąt tysięcy wejść na stronę internetową z fotografiami miesięcznie to nic w porównaniu z liczbami odsłon byle youtubowych filmów. Nakręciłem więc w domu minutowy film i wrzuciłem go do sieci. Zrobił się z tego wiral obejrzany parę milionów razy, a ja znów wylądowałem na tę okoliczność w różnych śniadaniowych telewizjach. I tak dalej. Tak czy owak, wśród fizyków zacząłem być kojarzony jako fotograf, a wśród fotografów jako fizyk.

Co dwie głowy, to nie jedna. Nic więc dziwnego, że współczesne komputery wyposażone są w wiele procesorów prowadzących obliczenia r ó w n o l e g l e. Ten tryb pracy, podobnie jak ten tryb myślenia, ma wiele zalet w porównaniu z wykonywaniem obliczeń szeregowo, czyli po kolei. Podejrzewa się zresztą, że nawet ludzki mózg jest zbiorem równoległych i niezależnych centrów obliczeniowych operujących jako całość za sprawą wzajemnych oddziaływań. Przyszło więc komuś do, *nomen omen*, głowy, by sprytnie zagospodarować prawa mechaniki kwantowej przy projektowaniu urządzenia prowadzącego obliczenia równoległe.

Jak pamiętamy z poprzednich rozdziałów, cząstki kwantowe potrafią zachowywać się tak, jak gdyby podróżowały wieloma drogami naraz. Gdyby na każdej z tych dróg umieścić specjalne przeszkody, które sprawiałyby, że podróżująca nimi cząstka wykonywałaby określone zadania, czy cząstka ta wykonywałaby w s z y s t k i e te zadania równocześnie? W klasycznym komputerze do wykonywania obliczeń używane są niewielkie impulsy elektryczne podróżujące wewnątrz procesorów poprzez ciąg

bramek logicznych. A gdyby tak zastąpić owe impulsy pojedynczymi cząstkami kwantowymi, a na różnych ich drogach umieścić różne bramki logiczne, czy tego typu „kwantowy procesor" wykonywałby wiele obliczeń n a r a z? Wszystko na to wskazuje! Taki hipotetyczny komputer ma już swoją nazwę, choć jak dotąd nikomu nie udało się go zbudować. Nazywa się go *komputerem kwantowym* i wiele ośrodków badawczych od wielu lat usilnie się stara go stworzyć. Wiem zresztą z pierwszej ręki (a raczej z pierwszej głowy), że sukces wydaje się być blisko. A taki sukces może oznaczać gwałtowne zmiany na liście najbogatszych ludzi na Ziemi.

Zbudowanie komputera kwantowego zrewolucjonizowałoby nasze życie. Osiągana przez niego szybkość obliczeń byłaby nieporównywalna z marnymi możliwościami jakiegokolwiek obecnego superkomputera. Posiadacz komputera kwantowego na dzień dobry złamałby wszystkie szyfry zabezpieczające transakcje bankowe. I zrobiłby to w ciągu ułamka sekundy. Nic więc dziwnego, że wielkie firmy, takie jak Google, IBM, Microsoft, inwestują gigantyczne pieniądze w badania nad stworzeniem takiego urządzenia. Powód jest prosty: jeśli miałoby się to udać, firmy te chcą o tym wiedzieć jako pierwsze, żeby zdążyć przygotować się do obrony przed atakami na istniejącą infrastrukturę informatyczną.

Prawa kwantowe są nie tylko głównym sprzymierzeńcem, ale i głównym wrogiem stojącym na drodze do zbudowania komputera kwantowego. Wiemy bowiem, że cząstka zachowuje się w sposób „kwantowy" tylko wówczas, gdy n i e jest obserwowana. Jakiekolwiek oddziaływanie obiektu kwantowego z otoczeniem błyskawicznie niszczy wszelkie kwantowe superpozycje, gdyż z punktu widzenia takiego obiektu oddziaływanie z otoczeniem niczym nie różni się od obserwacji. Trudność polega więc na tym,

aby cząstki używane do wykonywania obliczeń kwantowych jak najlepiej odizolować od otoczenia. Lub też skutecznie zniwelować niekorzystny wpływ takich oddziaływań.

†††

Postęp w budowie urządzeń posługujących się technologiami kwantowymi ma znamiona wyścigu zbrojeń. Czy zatem da się ochronić sekretne informacje przed posiadaczem komputera kwantowego, który bez kłopotu złamie każde klasyczne zabezpieczenie? W dodatku złamie je, posługując się niezbyt wyrafinowaną metodą „walca drogowego", czyli sprawdzając jednocześnie w s z y s t k i e możliwe warianty kluczy szyfrujących?

Skoro jest potrzeba, znajdzie się i sposób. Wynalazkiem gwarantującym prywatność informacji w nadciągającej erze komputerów kwantowych jest *kryptografia kwantowa.* Czyli szyfrowanie informacji za pomocą reguł mechaniki kwantowej współodkryte przez wybitnego fizyka i mojego kolegę, Artura Ekerta. Jeszcze jako student wpadł on na genialny, a jednocześnie praktyczny pomysł, który przyniósł mu ogólnoświatową sławę. Algorytmy kryptograficzne bazują najczęściej na systemie jednorazowych kluczy szyfrujących pozwalających na uzyskanie dostępu do tajnej informacji. W standardowych *protokołach kryptograficznych* (czyli schematach szyfrowania) klucze te generowane są losowo, a posiadacze muszą ich pilnie strzec, gdyż dostęp do nich otwiera drogę do przechwycenia poufnej wiadomości.

Sposób używania kluczy szyfrujących jest banalny. Wyobraźmy sobie, że pragniemy przesłać pewną prostą informację, na przykład

literę „A”, którą w zero-jedynkowym zapisie binarnym (tak zwanym *kodzie ASCII*) można zawrzeć w następującym ośmiocyfrowym ciągu zer i jedynek:

informacja = „A” = 01000001.

Aby bezpiecznie zaszyfrować tę informację, potrzebny jest ośmiocyfrowy klucz szyfrujący, który jest po prostu drugim ośmiocyfrowym ciągiem l o s o w y c h liczb, na przykład takim:

klucz = 11011100.

Procedura kodowania polega na wymieszaniu informacji i klucza. Robi się to cyfra po cyfrze, tworząc w ten sposób nowy, ośmiocyfrowy ciąg liczb zawierający zaszyfrowaną informację. Każda cyfra nowego ciągu otrzymywana jest w wyniku następujących operacji. Jeśli w informacji i kluczu na danym miejscu występowały zera, wówczas zaszyfrowana informacja ma w tym miejscu zero. Czyli, pisząc symbolicznie, mamy: 0+0 → 0. Znak „+” nie oznacza tu zwykłego dodawania, tylko wykonanie przez nas operacji mieszania dwóch liczb (tak zwanego *dodawania modulo 2)*. Jeśli w informacji na danym miejscu jest zero, a w kluczu jedynka (albo odwrotnie), wówczas zaszyfrowana informacja ma w tym miejscu jedynkę. Czyli: 0+1 → 1 albo 1+0 → 1. Natomiast jeśli w informacji i kluczu w danym miejscu są jedynki, wówczas w zaszyfrowanej informacji stawiamy zero: 1+1 → 0. W ten sposób z informacji i klucza możemy stworzyć zaszyfrowany ciąg, na zasadzie schematu:

informacja + klucz → zaszyfrowana informacja.

W naszym przykładzie jest to:

zaszyfrowana informacja = 01000001 + 11011100 = 10011101.

Cała metoda działa dzięki temu, że jedynym sposobem dobrania się do zakodowanej informacji jest posiadanie sekretnego klucza. Bez niego nikt na podstawie „zaszyfrowanej informacji" nie zdoła dowiedzieć się, jaka była oryginalna treść. Bo każda informacja wymieszana z losowym ciągiem zer i jedynek wygląda także kompletnie losowo. W celu odkodowania informacji wystarczy jednak ponownie „dodać" klucz, tym razem do zaszyfrowanego ciągu zer i jedynek, i w ten sposób odtwarzamy oryginalną informację:

zaszyfrowana informacja + klucz → informacja.

Polecam samodzielnie przekonać się za pomocą długopisu, że w powyższym przykładzie metoda działa niezawodnie:

10011101 + 11011100 → _ _ _ _ _ _ _ _.

Informacja może być w ten sposób kodowana w najróżniejszych wariantach. Ważne tylko, aby nadawca i odbiorca tajnej informacji dysponowali kluczem, którego nie posiada nikt inny. Kluczem tym może być jakikolwiek (najlepiej losowy) ciąg liczb, na przykład obrazek w komputerze. Obrazek taki jest przecież jedynie zbiorem pikseli o różnych wartościach liczbowych. Jeśli chciałbym wysłać komuś zakodowaną w obrazku informację, wystarczyłoby, bym nieco zmodyfikował niektóre z tych pikseli, dodając do nich liczby z mojej tajnej informacji. Jeśli odbiorca otrzyma ode mnie zmodyfikowany plik, wystarczy, że odejmie od niego oryginalne wartości liczbowe wszystkich pikseli, by uzyskać zakodowaną informację. Nic trudnego. Metoda ta ma jednak pewien

mankament. Sekretny klucz można zawsze wykraść i skopiować. A wówczas całe szyfrowanie jest na nic.

Okazuje się, że w kwantowych wersjach takich protokołów szyfrujących da się całkowicie uniknąć problemu kradzieży klucza. Wystarczy, że sekretny klucz zostanie wygenerowany i rozdany obu stronom, z a n i m przesłana zostanie sama informacja. Jeśli klucz zakodowany jest w stanach kwantowych pojedynczych cząstek, nie można go odczytać bez jego zniszczenia bądź modyfikowania. Wiemy bowiem, że każda obserwacja stanu kwantowego prowadzi nieuchronnie do jego zmiany. A zatem każdy niepowołany dostęp do klucza musi pozostawić po sobie wykrywalny ślad. Dopiero wówczas, gdy klucz okaże się nienaruszony, przesyłana zostaje zaszyfrowana informacja, która tym samym staje się w pełni zabezpieczona.

A jak sprawdzić, czy klucz jest nadal nienaruszony? Wystarczy, że obie strony wspólnie wybiorą kilka losowych fragmentów klucza i je odczytają. Jeśli oba wyniki okażą się identyczne, będzie to oznaczać, że w te fragmenty nikt nie ingerował, a ponieważ były one wybrane losowo, można przyjąć, że pozostała część klucza była również nienaruszona. Upewniając się, że jedynie strony wysyłająca i odbierająca są w posiadaniu klucza, uzyskujemy pewność, że możemy stuprocentowo bezpiecznie przesyłać sobie zaszyfrowaną informację. Jak widać, bezpieczeństwo tego protokołu jest bezpośrednią konsekwencją praw kwantowych.

†††

Mówi się często, że żyjemy w erze informacji. Paradoksem naszego położenia jest to, że owa informacja jeszcze nigdy w historii nie była aż tak bezwartościowa. Legendarny pierwszy maratończyk

oddał życie, by przekazać informację o zwycięstwie Greków nad Persami w bitwie pod Maratonem. Był to zaledwie jeden bit informacji. Jego wartość logiczna „1" oznaczała zwycięstwo. Wartość „0" oznaczałaby porażkę. Jednak dla owego maratończyka wartość tego konkretnego bitu przekraczała wartość jego własnego życia. Tak cenna potrafiła być informacja w zamierzchłych czasach. Obecny dzienny przepływ informacji przez nasze smartfony jest dziesięć miliardów razy większy, a prędkość obiegu tej informacji, bliska prędkości światła, jest sto milionów razy szybsza niż prędkość najszybszego maratończyka.

Dramatem ludzi starych nie jest to, że są starzy, lecz to, że są m ł o d z i. Do niedawna osoby starsze były przynajmniej skarbnicą wiedzy, z której można było czerpać w potrzebie. To zaś przydawało starszyźnie prestiżu i powszechnego szacunku. Obecnie nawet tego ich pozbawiono, bo wszystko da się o wiele szybciej i pewniej wyguglować. Podejrzewam, że nawet zawiłości szydełkowania są już obszerniej i dogłębniej opisane w przestrzeniach internetu, niż w czeluściach mózgu najukochańszej i najmądrzejszej nawet babci. Dzięki temu (albo przez to) wartość informacji, na którą kiedyś wyczekiwało się tygodniami, została drastycznie zredukowana. Obecnie informacja nas wręcz zaśmieca. Mówienie, że żyjemy w erze informacji, nie różni się wiele od stwierdzenia, że żyjemy na śmietniku.

Informacja wciąż krąży i krąży, i wszędzie jej pełno. W pogoni za nią fizycy konstruują coraz to nowe sposoby przekazywania jej. Jednym z bardziej osobliwych jest *teleportacja kwantowa* – protokół komunikacyjny wynaleziony całkiem niedawno i bazujący na prawach mechaniki kwantowej.

Wyobraźmy sobie, że posiadamy pojedynczą cząstkę, nazwijmy ją cząstką *A*, która znajduje się w pewnym nieznanym stanie

kwantowym. Naszym zadaniem będzie „przeteleportowanie" tego stanu na inną cząstkę, którą nazwiemy cząstką *B*. Przy czym ani jedna, ani druga cząstka nie mogą zmienić swojego położenia, a przenoszona jest jedynie zakodowana informacja. Najprostsze nasuwające się rozwiązanie prowadzące do celu byłoby następujące: najpierw zmierzyć stan cząstki *A*, po czym, posługując się zdobytą informacją, „zakodować" ów stan w cząstce *B*. Okazuje się, że nic z tego. Nie jest bowiem możliwe jednoznaczne stwierdzenie za pomocą pojedynczego pomiaru, w jakim stanie znajduje się cząstka. Wynik takiego pomiaru jest do pewnego stopnia losowy – raz taki, raz inny. I niewiele powie on nam na temat pierwotnego stanu cząstki.

Aby uzyskać pełną informację o stanie cząstki, musielibyśmy dysponować nieskończoną, a przynajmniej bardzo dużą liczbą takich cząstek w identycznych stanach kwantowych. I dopiero wykonując pomiary każdej kopii z osobna, moglibyśmy na podstawie uzyskanej statystyki wyników zrekonstruować ów stan.

Jest to kolejna niezwykła właściwość mechaniki kwantowej. Inaczej jest w znanym nam, klasycznym świecie: jeśli na przykład ktoś napisze na kartce literę – wystarczy r a z spojrzeć i od razu wiemy, jaka to litera. Nie potrzebujemy do tego stosu identycznych kartek. W przypadku stanów kwantowych jeden pomiar to za mało. Potrzebna jest duża liczba identycznych k o p i i badanego obiektu. Nie da się bowiem wielokrotnie mierzyć tej samej cząstki – już po pierwszym pomiarze jej stan ulega nieodwracalnej zmianie.

Czy możliwe jest zatem teleportowanie stanu kwantowego z jednej cząstki na drugą? O dziwo tak, a w dodatku nawet wtedy, gdy cząstki te są w bardzo dużej odległości od siebie. W 2012 roku dokonano teleportacji kwantowej stanu fotonu pomiędzy dwiema

Wyspami Kanaryjskimi oddalonymi o ponad 140 kilometrów. W takich eksperymentach fizycy zazwyczaj dobrze wiedzą, co teleportują, więc mogą od razu sprawdzić, czy teleportacja przebiegła pomyślnie. Jednak nawet gdyby wysyłali nieznany stan, procedura wciąż by działała, mimo że w tym przypadku ani strona teleportująca, ani odbierająca nie dowiedziałaby się, co właściwie zostało przeteleportowane. Można jedynie mieć pewność, że ów nieznany stan przeskoczył z cząstki *A* na cząstkę *B*.

A teraz ludzkim głosem. Wyobraźmy sobie, że napisaliśmy list, włożyliśmy go do koperty i dajemy tę kopertę listonoszowi. Chcielibyśmy, żeby nasz list trafił do skrzynki wiszącej na sąsiedniej wyspie. Niestety, listonosz nie ma łódki, a w dodatku nie umie pływać. Więc nie może po prostu dostarczyć listu. No ale może mógłby chociaż otworzyć list, przeczytać go i przedyktować jego treść przez telefon, jak kiedyś wysyłało się telegramy? Niestety, tak również nie da rady, bo list jest kwantowy i jego pojedynczy egzemplarz nie wystarczy, by odczytać treść. Nie mówiąc o tym, że wolelibyśmy, żeby listonosz nie wścibiał nosa w nieswoje sprawy.

Na szczęście zostaje jeszcze teleportacja. Dzięki niej list może bezpiecznie trafić do koperty czekającej w odległej skrzynce, a listonosz, który przeprowadzi całą procedurę, w ogóle się nie dowie, o czym pisaliśmy.

Kluczowym składnikiem niezbędnym do wykonania teleportacji jest stan splątany, o którym mówiliśmy wcześniej (ten z dwoma fotonami o różnych kolorach, lecącymi w dwie strony). Aby wykonać teleportację najprostszego kwantowego „listu", trzeba wcześniej stworzyć pojedynczy stan splątany dwóch cząstek. W trakcie wykonywania teleportacji splątanie to nieuchronnie ulega zniszczeniu, a zatem jest ono pewnym rodzajem p a l i w a

zasilającego cały protokół. Jak widać, w trakcie teleportacji kwantowej nie są przenoszone same cząstki, a jedynie kwantowa i n f o r m a c j a, która jest w nich zakodowana. Zatem teleportacja znana z filmów *science fiction* ma mniej więcej tyle wspólnego z teleportacją kwantową, co krzesło z krzesłem elektrycznym.

# ROZDZIAŁ JEDENASTY

## *czas i niepamięć*

PODOBNO JEDYNĄ RZECZĄ, która nigdy się nie kończy, jest teraźniejszość. Autor tej złotej myśli ewidentnie zapomniał o serialu „Moda na sukces". Teraźniejszość, podobnie jak wspomniany serial, ma to do siebie, że niezmordowanie przemija, ale wciąż uporczywie trwa. Każdy doskonale zna to wrażenie, ale trudno znaleźć dobry sposób na ujęcie go słowami. Ale czy teraźniejszość nie jest aby tylko złudzeniem?

Na samym początku, gdy pisałem, że ruch jest obrotem czasoprzestrzeni, wspomniałem, że jeśli wsiąść na rower i pojechać powoli w stronę gwiazdy oddalonej od nas o sto lat świetlnych, to „teraźniejszość" ulegnie zmianie i gwiazda od razu zestarzeje się o minutę. A jeśli pojedziemy w drugą stronę, gwiazda odmłodnieje o tyle samo. Gdyby ktoś chciał przyjąć roboczą hipotezę, że pojęcie teraźniejszości ma jakikolwiek sens, to musiałby nieustannie brać pod uwagę swoją prędkość, która ciągle się zmienia. Czy to oznacza, że pytanie, które wydaje się dość niewinne: cóż takiego dzieje się t e r a z na odległej gwieździe, nie ma w ogóle sensu? Skoro nawet bujanie się na fotelu w tył i w przód będzie nieustannie zmieniać odpowiedź? Na to wygląda.

Odczuwamy czas jako coś płynącego wiecznie naprzód. Ale dlaczego właściwie tak nam się w y d a j e? Czy jest to „oczywiste", a jeśli tak, to jakie są powody? Na moje oko wrażenie to ma tylko

dwa podstawowe źródła. Pierwszy powód jest następujący: pamiętamy swoją p r z e s z ł o ś ć, lecz nie pamiętamy p r z y s z ł o ś c i. Jest to prawda zakorzeniona w naszych głowach aż tak głęboko, że wyrażenie „pamiętać przyszłość" wydaje się wręcz absurdalne. Ale niby czemu? Dlaczego pamiętamy tylko swoją przeszłość?

Zazwyczaj unikam mówienia, że coś jest „oczywiste", a jeśli robię wyjątek, to tylko wówczas, gdy potrzeba mi najwyżej dwudziestu sekund, żeby podać logiczne i przekonujące uzasadnienie. Dla większości ludzi pytanie „dlaczego pamiętamy przeszłość, lecz nie pamiętamy przyszłości" w y d a j e s i ę dość oczywiste. Lecz jest to jedna z tych oczywistych oczywistości, których nikt nie potrafi dobrze wyjaśnić. Bo gdy poprosimy kogokolwiek o uzasadnienie, odpowiedź przychodzi do głowy, ale nie chce z niej wyjść. Język tajemniczo staje w gardle bądź odpowiedź tworzy logiczną pętlę. Ja na przykład nie wiem, dlaczego nie pamiętam swojej przyszłości. Mam na ten temat co najwyżej pewne mgliste podejrzenia.

Jest niemal zasadą, że słowo „oczywiste" używane jest jako proteza myślowa będąca zamiennikiem stwierdzenia „n i e r o z u m i e m". Podobnie jak użycie słowa „znany" ujawnia, że tak naprawdę ktoś jest nieznany. Używa się określenia „znany aktor", „znany pisarz", ale nikt nie powie przecież „znany papież" albo „znany prezydent". Pewnie dlatego, że papież i prezydent n a p r a w d ę są znani.

W języku potocznym w ogóle na próżno szukać logiki. Szczególnie w języku polskim, w którym słowa „opodal" i „nieopodal", będące swoimi logicznymi zaprzeczeniami, oznaczają przecież dokładnie to samo. Podobnie ze słowami „precedensowy" i „bezprecedensowy".

Można by się tym wcale nie przejmować, lecz znane jest twierdzenie matematyczne mówiące, że z przyrównania dowolnych

sprzecznych ze sobą wielkości wynika logicznie dowolne twierdzenie. Dowolne, a więc nawet fałszywe. Czyli z przyrównania sprzeczności można wydedukować dowolną bzdurę!

Ktoś kiedyś na tę okoliczność zapytał wybitnego logika Bertranda Russella, czy z założenia, że 1=0 wynika, że jest on papieżem. Russell przytaknął, podając następujący dowód. Przyjmijmy, że 1=0. Następnie dodajmy do obu stron liczbę 1, uzyskując równość 2=1. Papież i ja to dwie różne osoby, powiedział Russell. Skoro jednak dwa jest tym samym, co jeden, to papież i ja musimy być jedną i tą samą osobą.

I tylko niesforny Niels Bohr mawiał, że *głęboka prawda to takie stwierdzenie, którego zaprzeczenie jest również głęboką prawdą.*

No dobra, ale dość tych dygresji. Czemu do diabła pamiętamy tylko przeszłość, a ani trochę nie pamiętamy przyszłości? Kwestia ta ma co nieco wspólnego z pytaniem, nad którym już się głowiliśmy – dlaczego rower się nie przewraca, gdy ktoś na nim jedzie. W obu przypadkach chodzi o rzecz zupełnie wszystkim znaną i w obu przypadkach trudno usłyszeć sensowne wyjaśnienie. Dwa powyższe pytania dzieli jednak przepaść. Mechanizm stabilizacji roweru, który udało nam się odkryć, okazał się dość banalny (mimo że większość rowerzystów jest go kompletnie nieświadoma). Natomiast na pytanie, dlaczego pamiętamy tylko przeszłość, nauka w o g ó l e nie ma pewnej odpowiedzi.

†††

Zapomnijmy na chwilę o efektach kwantowych i skupmy się na zjawiskach opisywanych przez klasyczną mechanikę, która jest zbiorem prostych praw, praw Newtona, które jednoznacznie przewidują przyszłość chociażby lecących w powietrzu kamieni.

Jeśli chcielibyśmy rzucić kamieniem, to znając jego początkową prędkość i kąt, pod którym rzucamy, będziemy w stanie o b l i c z y ć jego dalsze losy. Czyli na przykład gdzie i po jakim czasie upadnie on na ziemię. Z jaką prędkością o nią walnie i tak dalej. Do przewidywania takich rzeczy służą prawa Newtona.

Stosując te same prawa, projektuje się także trajektorie pojazdów kosmicznych, by mogły one bezpiecznie dotrzeć w precyzyjnie wybrane miejsce Układu Słonecznego. W idealnej sytuacji wystarczy nadać rakiecie odpowiednią prędkość w początkowej fazie lotu i obejdzie się bez odpalania silników później, bo rakieta i tak sama dotrze, gdzie trzeba.

Klasyczne prawa ruchu mają jednak w sobie coś dziwnego. Sprecyzowanie warunków początkowych pozwala przewidzieć przyszłość obiektu, takiego jak kamień lub rakieta. Działa to jednak w dwie strony. Znając stan obiektu w danej chwili, możemy wyznaczyć także jego p r z e s z ł o ś ć. Czyli jeśli wiemy, w jakim miejscu, z jaką prędkością i pod jakim kątem upadł na ziemię kamień, możemy łatwo wyliczyć, skąd został wyrzucony. W dodatku prawa opisujące ruch „do przodu" i „do tyłu" w czasie są dokładnie takie same! Gdyby na przykład nagrać kamerą podłączoną do mikroskopu ruch cząsteczek gazu w równowadze termodynamicznej, bezustannie zderzających się ze sobą, po czym puścić film od tyłu, nikt by się nie zorientował, że wszystko leci na wstecznym. Nie dałoby się nijak stwierdzić, czy film został puszczony do tyłu czy do przodu w czasie. Sprawa wygląda trochę tak, jak gdyby prawa mechaniki klasycznej tak samo „pamiętały" przyszłość, jak i przeszłość, bo jedną i drugą da się jednoznacznie wydedukować z aktualnej sytuacji. W mądrych książkach od fizyki nazywa się to *odwracalnością w czasie* praw Newtona.

No to czemu w takim razie w świecie, do którego jesteśmy przyzwyczajeni, tylko jeden kierunek upływu czasu jest wyraźnie odczuwalny? Zdarza się przecież, że wazony z kwiatami tłuką się na kawałki, podczas gdy proces odwrotny, w którym leżące na ziemi okruchy poskładają się w stojący na stole wazon, raczej się nie wydarzy. Obecność procesów, zachodzących tylko w jedną stronę w czasie, stanowi d r u g i powód, dla którego odczuwamy czas jako coś, co płynie zawsze w jednym kierunku.

Nie dość, że nie pamiętamy przyszłości, to wiele znanych nam zdarzeń, takich jak tłuczenie się wazonów, zachodzi tylko w jednym kierunku, a nigdy odwrotnie. Choć przecież odwrotna ewolucja – od potłuczonych okruchów do wazonu stojącego na stole – byłaby w pełni zgodna z prawami ruchu, które s ą odwracalne w czasie. Nasz świat wcale nie jest palindromem, który wygląda identycznie puszczony do przodu i do tyłu w czasie. Te dwa powody sprawiają, że jesteśmy przeświadczeni, że czas płynie zawsze do przodu. Pogłówkujmy przez moment, dlaczego?

Przykład z wazonem ma wiele wspólnego z trudnościami towarzyszącymi kierowcom podczas parkowania samochodu. Jak wiadomo, o wiele trudniej jest zaparkować samochód, szczególnie w wąskim miejscu parkingowym, niż wyjechać z tego miejsca. Skąd bierze się ta asymetria, skoro czynności towarzyszące parkowaniu to dokładnie te same czynności, które wykonuje się przy wyparkowywaniu, lecz w odwrotnej kolejności? Odpowiedź na to pytanie wiąże się z liczbą możliwych ustawień, w jakich samochód może zostać zaparkowany, oraz liczbą możliwych ustawień, w jakich może się znaleźć samochód wyparkowany.

Zwróćmy uwagę, że im węższe miejsce parkingowe, tym mniejsza tolerancja na możliwe błędy w parkowaniu. Jest tak dlatego, że w bardzo wąskim miejscu możemy zaparkować samochód

niemal wyłącznie w jednej pozycji. Natomiast wyjeżdżając stamtąd, możemy to zrobić na wiele sposobów. Możemy skręcić w prawo, w lewo, pojechać prosto. Możliwości jest mnóstwo. Dlatego właśnie czynność parkowania jest taka trudna. Liczba możliwych „stanów końcowych", do jakich dążymy, jest niewielka w porównaniu z ogromem możliwości, jakie mamy, wyparkowywując.

To samo jest z wazonem, który może zostać poskładany z kawałków tylko w jednej konfiguracji, podczas gdy liczba sposobów, na które mogą ułożyć się roztrzaskane fragmenty, jest ogromna. Z tego powodu obiekty fizyczne wydają się dążyć do zwiększania własnego nieuporządkowania, podczas gdy samoczynne porządkowanie w zasadzie się nie zdarza. Zresztą wszyscy rodzice doskonale wiedzą, że zabawki o wiele lepiej służą do bałaganienia niż do sprzątania. Po prostu zbiór możliwych uporządkowanych stanów dowolnego zestawu przedmiotów, także zabawek, jest zazwyczaj dużo mniej liczny niż zbiór stanów nieuporządkowanych.

Argument z „parkującym autem" wyjaśnia, dlaczego nie widuje się wazonów spontanicznie układających się ze swoich bezładnie porozrzucanych fragmentów. Teoretycznie bowiem można by każdemu z tych fragmentów nadać dokładnie taką prędkość początkową, by wskoczył on na swoje miejsce w wazonie wraz ze wszystkim pozostałymi kawałkami. Wymagałoby to jednak niewyobrażalnej precyzji wyboru tych *warunków początkowych* (i to na poziomie pojedynczych cząsteczek), która jest całkiem zbędna, jeśli chcemy ów wazon po prostu rozbić. A na aż tak niewiarygodne zbiegi okoliczności nie ma co liczyć, to nie totolotek.

†††

Przykład parkującego auta jest często podawany jako ilustracja i wyjaśnienie pozornej asymetrii upływu czasu w naszych codziennych doświadczeniach, mimo że prawa mechaniki klasycznej wydają się nie wyróżniać żadnego kierunku upływu czasu. Niektórzy idą o krok dalej, twierdząc, że podobny mechanizm musi być odpowiedzialny za nasze doświadczenie pamiętania przeszłości, lecz nie przyszłości. Jest to hipoteza warta przemyślenia, bowiem prawa mechaniki klasycznej, elektrodynamiki, a nawet mechaniki kwantowej wydają się takie same do przodu, jak i do tyłu w czasie. Trudno więc o wskazanie jakiegokolwiek innego mechanizmu, który mógłby wyjaśnić skrajną różnicę w naszym odczuwaniu tego, co było, i tego, co będzie.

Spośród wszystkich znanych fundamentalnych praw przyrody znane jest tylko jedno, które łamie *symetrię odbicia czasu,* lecz jest ono związane z oddziaływaniami i rozpadami pewnych egzotycznych cząstek elementarnych. Tak zwane oddziaływanie słabe, bo o nim mowa, wydaje się jednak nie odgrywać widocznej roli w naszym codziennym życiu, dlatego powoływanie się na nie jest niezbyt przekonujące. Czy zatem nasze skrajnie różne wrażenie przeszłości i przyszłości może być jakąś odległą pochodną trudności związanych z parkowaniem samochodu? Nie mam pojęcia i nie sądzę, żeby w chwili obecnej ktokolwiek miał na to dowody. Niemniej niektórzy fizycy tak właśnie podejrzewają.

†††

Ludzie nie pamiętają swojej przyszłości, lecz przynajmniej pamiętają przeszłość. Zdarzają się jednak nieszczęśnicy, który nie potrafią nawet tego. Ciekawą historię opisywał neuropsychiatra, Olivier Sacks. Jeden z jego osobliwych pacjentów na bieżąco

zapominał absolutnie wszystko, co się działo wokół niego. Wystarczyło trzydzieści sekund. Gość doskonale pamiętał całe swoje życie, aż do pewnego momentu. Później trop się urywał. Można było z nim normalnie gawędzić, był bystrym facetem, lecz gdy wyszło się na moment z pokoju, a potem wróciło, trzeba się było od początku przedstawiać. Kompletny reset.

W młodości tego człowieka musiał wydarzyć się jakiś tragiczny wypadek, który zaburzył działanie mózgu. Facet ten był zresztą przekonany, że wciąż ma dwadzieścia parę lat. Takiego siebie pamiętał, choć w rzeczywistości był już po pięćdziesiątce. Pokazanie mu lustra wywoływało głęboki szok, który jednak mijał po trzydziestu sekundach...

Odkąd przeczytałem historię tego pacjenta, który w pewnym sensie został przeniesiony w przyszłość, intrygowało mnie, czy będąc w podobnej sytuacji, zdołałbym zdać sobie sprawę ze swojego położenia? Czy trzydzieści sekund by wystarczyło? Tak się złożyło, że miałem okazję się o tym przekonać.

Otworzyłem oczy i okazało się, że znajduję się w jednym z moich ulubionych miejsc. Czyli na Kasprowym Wierchu, w okolicy Hali Goryczkowej. Był słoneczny dzień, ja siedziałem na rewelacyjnym, wiosennym śniegu, a do nóg miałem przypiętą deskę snowboardową. Obok mnie było dwóch gości, którzy coś do mnie krzyczeli. Jednego nie znałem, a drugi był moim kumplem. Tylko jak to się stało, że się tam znaleźliśmy? Znajomy coś do mnie mówił, ale ja czułem się jakoś dziwnie. Coś było nie tak. I wtedy jakimś cudem do mnie d o t a r ł o: cały czas o w s z y s t k i m zapominam! Nie pamiętam nawet początków długich zdań! Poczułem się tym nieźle podekscytowany.

Mówię do kumpla: słuchaj, będziesz musiał mi wszystko w kółko powtarzać, bo zapominam. Co ja tu robię? On zaczyna nawijać, a ja

czuję, że nie pamiętam już początku zdania. Więc pytam znowu: ale co ja tu robię? Ten znowu zaczyna. I tak w kółko. Ale z jakiegoś powodu udało mi się zapamiętać, że zapominam.

Powiedzieli mi potem, że mój nietypowy stan utrzymywał się około kwadransa, zanim tryb zapisu w mojej głowie został przywrócony. Okazało się, że zdarzył się wypadek przy dużej prędkości, zjechałem bezładnie kilkadziesiąt metrów i musiałem gdzieś pod drodze solidnie walnąć się w głowę. Na szczęście nie byłem sam i historia skończyła się przejażdżką helikopterem. Żeby było dziwniej, nic mnie nie bolało i nie miałem nawet jednego siniaka. Jeszcze wiele godzin nie pamiętałem poprzednich dwóch dni. W końcu jednak udało mi się jakoś zrekonstruować chronologię, aż do kilkunastu sekund przed urwaniem się filmu. Okazało się zresztą, że drugiego gościa, który stał nade mną na śniegu, poznałem dwa dni wcześniej. To on przywiózł mnie swoim samochodem w góry. W każdym razie na kwadrans poczułem się jak pacjent słynnego Oliviera Sacksa.

†††

Tymczasem problem odróżniania przeszłości i przyszłości wydaje się wciąż nierozwiązany. Wiąże się z tym interesująca historia, która miała miejsce kilkadziesiąt lat temu, w trakcie prowadzenia badań nad teorią elektromagnetyzmu.

W klasycznej wersji tej teorii ładunek elektryczny wytwarza wokół siebie pole elektromagnetyczne. Ale jeśli poruszymy trzymanym w ręku ładunkiem, to znajdujący się w dużej odległości obserwator stwierdzi zmianę pola dopiero po pewnym czasie, bo zaburzenie będzie rozchodzić się z prędkością światła. To właśnie odkrył James Maxwell. Oznacza to mniej więcej tyle, że badając

wartość pola elektromagnetycznego w jakimś miejscu, dowiadujemy się czegoś na temat położeń wszystkich ładunków elektrycznych wytwarzających to pole nie w chwili obecnej, lecz w p r z e s z ł o ś c i. Podobnie, patrząc na światło odległych gwiazd, obserwujemy ich przeszłość, a n i e teraźniejszość, bo docierające do nas światło mogło podróżować od gwiazd do naszych oczu nawet setki milionów lat. „W tym momencie" gwiazdy te mogą już nawet dawno nie istnieć.

Ta pozornie prosta obserwacja ma w sobie jednak coś niepokojącego. Równania opisujące prawa elektromagnetyzmu działają w sposób identyczny zarówno do przodu, jak i do tyłu w czasie. Oznacza to, że żadne zjawisko elektromagnetyczne nie powinno w y r ó ż n i a ć przeszłości od przyszłości. Skoro tak, to dlaczego widzimy światło gwiazd docierające do nas z zamierzchłej przeszłości, nie zaś z przyszłości? O dziwo, nie da się tego wcale uzasadnić wyłącznie na gruncie teorii elektromagnetyzmu!

Tym pozornie absurdalnym pytaniem zajęło się dwóch wybitnych fizyków: Richard Feynman oraz jego promotor, John Wheeler, którzy poświęcili sporo wysiłku na rozwinięcie teorii, w której zaburzenie elektromagnetyczne rozchodzi się nie tylko do przodu, ale również d o t y ł u w czasie (pierwszą osobą, która poruszyła ten problem, był inny noblista i współtwórca teorii kwantowej, Paul Dirac). Być może najbardziej zaskakującym wnioskiem z ich rozważań było to, że wnioski z tak zmodyfikowanej teorii w zasadzie n i c z y m nie różniły się od ortodoksyjnego wariantu teorii elektromagnetyzmu, w którym światło zawsze biegnie w przód w czasie. Trudno było wskazać jakiekolwiek obserwowalne konsekwencje spektakularnej, wydawałoby się, hipotezy, że fundamentalne oddziaływania mogłyby rozchodzić się nie tylko w przód, ale również wstecz

w czasie. Zasada, że przyczyny zjawisk znajdują się zawsze w przeszłości, a nie w przyszłości, może więc nie być aż tak oczywista.

†††

Podobną koncepcję rozważa się od wielu lat w odniesieniu do zjawisk kwantowych. Zdarzenie, które swoją przyczynę miałoby w przyszłości, wydawałoby się nam kompletnie spontaniczne i nieprzewidywalne. Wyobraźmy sobie na przykład, że ktoś nagle przybywa do nas z przyszłości. Stephen Hawking już raz organizował przyjęcie, na które zaprosił przybyszów z przyszłości. O ile mi jednak wiadomo, nikt taki się nie zjawił. Ale gdyby mimo wszystko ktoś do nas z przyszłości dotarł, czy dałoby się tę wizytę jakoś przewidzieć? Zapewne nie. Takie odwiedziny byłyby dla nas sporym zaskoczeniem. O ile „przewidywalność" oznacza możliwość tworzenia ciągów przyczynowo-skutkowych, w których przyczyna zachodzi wcześniej, a skutek później.

Nagłe pojawienie się przybysza wyglądałoby tak, jakby pojawił się kompletnie znikąd. W sposób spontaniczny i niemożliwy do przewidzenia. Może więc nieprzewidywalność zjawisk kwantowych, o których mówiliśmy wcześniej, dostarcza argumentu za tym, że przyczyny tych zjawisk po prostu nie znajdują się wyłącznie w przeszłości? Być może przyczyna tego, że pojedynczy foton odbija się od kawałka szkła bądź przez nie przechodzi, zlokalizowana jest dopiero w przyszłości tego zdarzenia? Na przykład w momencie detekcji, który dopiero ma nastąpić? Jest grupa całkiem poważnych fizyków, którzy na serio rozważają taki scenariusz.

I muszę przyznać, że mnie osobiście ten obraz sytuacji wydaje się dość atrakcyjny, być może dlatego, że nie znam żadnych powodów, dla których przyczyny zjawisk musiałyby zawsze następować przed nimi, a nie po nich. Jedna z uniwersalnych zasad, mówiąca, że przyczyna musi być najpierw, a skutek dopiero później, zwana *zasadą przyczynowości*, ma dość mętne źródła. A jak się zastanowić, to trudno takie źródła w ogóle wskazać. Niestety, główną wadą szalonych hipotez z umieszczaniem skutków przed przyczynami jest to, że nie wiadomo, jak sprawdzić ich prawdziwość. Bo podobnie jak w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych, zazwyczaj nie wynikają z nich żadne nowe przewidywania.

Okazuje się, o dziwo, że teoria kwantowa zmodyfikowana w taki sposób, żeby przyczyna mogła być częściowo w przyszłości, w zasadzie niczym nie różni się od standardowej wersji tej teorii. Wygląda więc na to, że wprowadzanie zasady przyczynowości do fizyki zmienia zaskakująco niewiele. Teoria, w której przyczyny zjawisk znajdują się częściowo w przyszłości, doskonale opisuje to, co obserwujemy. Czy to znaczy, że rzeczywistość jednak jest palindromem, a kierunek upływu czasu to tylko iluzja? Kobyła ma mały bok?

†††

Aby oczyścić naukę z gdybania, jedynie sprawdzalne hipotezy traktuje się w niej poważnie. Od dawna podejrzewano, że krowy potrafią wyczuwać znajdujące się wokół pole magnetyczne. Przetestowanie takiej hipotezy było jednak sporym wyzwaniem, gdyż krowy niechętnie na ten temat muuuu-wią, a trudno jest stać się krową i zweryfikować rzeczoną hipotezę osobiście. Znalazła się

jednak grupa badaczy, którzy zdołali dostarczyć przekonujących danych na ten temat. W dodatku badania przeprowadzone zostały bez udziału samych zainteresowanych (czyli krów), a wyłącznie przy użyciu wyszukiwarki internetowej Google Maps.

Udało się dzięki niej odnaleźć sporą liczbę fotografii satelitarnych przedstawiających stada krów pasących się w pobliżu linii wysokiego napięcia. Wiadomo, że przewód z prądem elektrycznym wytwarza wokół mierzalne pole magnetyczne. Pojawiło się więc pytanie, czy bliskość takich przewodów ma wpływ na zachowanie krów. Analiza zdjęć satelitarnych ujawniła, że krowy zdecydowanie chętniej ustawiały się prostopadle do kierunku przewodów elektrycznych, czyli wzdłuż wytwarzanego pola magnetycznego.

Skądinąd cesarz Napoleon Bonaparte znany był z obyczaju spania wyłącznie z głową na północ, czyli w kierunku ziemskiego pola magnetycznego. Zupełnie jak krowy. To zresztą nie jedyny związek zwierząt hodowlanych ze znanymi politykami. „New York Times", relacjonując wizytę Nikity Chruszczowa na amerykańskiej farmie, opublikował jego zdjęcie wśród tamtejszych świń, podpisując je: towarzysz Chruszczow – trzeci od lewej.

Powróćmy jednak do spekulacji na temat kierunku upływu czasu. Jednym z interesujących odkryć dotyczących fizyki cząstek elementarnych jest to, że istnieje w przyrodzie dość niewiele rodzajów takich cząstek. Nasze organizmy i niemal wszystko, co znajduje się wokół nas, zbudowane są wyłącznie z trzech rodzajów cząstek: elektronów i dwóch rodzajów *kwarków* (z których zbudowane są protony i neutrony), a światło – z fotonów. Pozostałe cząstki znane w przyrodzie występują głównie w przestrzeni kosmicznej. Nikt zresztą nie wie, d l a c z e g o istnieją takie, a nie inne rodzaje cząstek, jest to jedna z największych zagadek współczesnej fizyki. Wiadomo jednak, że dla każdego

istniejącego rodzaju cząstki musi istnieć jej lustrzany odpowiednik – *antycząstka*. Na przykład antycząstką elektronu jest *pozyton* – cząstka o bardzo podobnych do elektronu właściwościach, a jednak wykazująca elementarne różnice. Swoją drogą Paul Dirac, który przewidział istnienie antymaterii, zrobił to, nie wstając zza biurka. Wystarczyły mu kartka, długopis i kosz na śmieci.

Antymateria może być dla nas dość niebezpieczna. Jeśli dowolna cząstka spotka na swej drodze antycząstkę, wówczas obydwie znikają w procesie zwanym *anihilacją*, a w ich miejsce pojawiają się fotony unoszące energię anihilowanych cząstek. Możliwy jest też proces odwrotny, w którym energia fotonów jest użyta do wykreowania pary cząstka-antycząstka, które zresztą chwilę później mogą znów zanihilować. Proces taki nazywa się mało oryginalnie *kreacją pary*.

Jedną z najciekawszych własności antycząstek jest jednak to, że zachowują się one dokładnie tak, jak gdyby były zwykłymi cząstkami, lecz poruszającymi się nie do przodu, a do tyłu w czasie. Tego typu interpretację antymaterii podał Richard Feynman.

Jeśli rzeczywiście fundamentalne mikroskopowe obiekty mogą poruszać się zarówno w przód, jak i w tył w czasie, oznacza to, że wrażenie, że czas zawsze biegnie naprzód, może być tylko zjawiskiem pozornym. Zespół Lady Pank w piosence „Mniej niż zero" śpiewał: *choć to fizyce wbrew, wskazówka cofa się*. Jak widać, fizycy potrafią być bardziej rockandrollowi niż gwiazdy rocka.

Inspiracją dla Feynmana była przewrotna hipoteza postawiona przez Johna Wheelera. Podobno zadzwonił on w środku nocy do Feynmana, mówiąc, że wie, dlaczego wszystkie elektrony na świecie mają dokładnie takie same masy i takie same ładunki.

I dlaczego w ogóle są takie same. Powód jest następujący: bo to jeden i ten sam elektron!

Ów elektron porusza się do przodu w czasie, chwilę potem zawraca, poruszając się wstecz w czasie, potem znów do przodu, potem znów do tyłu i tak dalej. W ten sposób w każdej chwili widzimy ten sam elektron w różnych miejscach, czasami jako elektron, a czasem jako pozyton (jeśli akurat poruszał się wstecz w czasie). Miejsca, w których elektron zawraca w czasie, odbieralibyśmy jako anihilacja albo kreacja pary elektron-pozyton. Nic zatem dziwnego, że wszystkie elektrony na świecie są identyczne. Ideę Wheelera przedstawia powyższy obrazek.

Widać na nim cząstkę poruszającą się z punktu *A* do punktu *B* do przodu w czasie, a więc jako najzwyklejszy elektron. W punkcie *B* elektron zawraca w czasie, poruszając się do wcześniejszego punktu *C*. Na tym odcinku jest on postrzegany jako pozyton. W punkcie *B* elektron i pozyton spotykają się i anihilują. Natomiast zdarzenie w punkcie *C* wygląda jak kreacja pary elektron-pozyton. „Potem" sytuacja się powtarza. Między punktem *C* i *D* cząstka

porusza się do przodu w czasie, jak przyzwoity elektron, w punkcie *D* jeszcze raz zawraca i tak dalej.

Wszystko ładnie i pięknie, ale Feynman przytomnie zapytał Wheelera: no dobrze, ale dlaczego pozytonów nie ma na świecie d o k ł a d n i e tyle samo, co elektronów? I to pytanie przyniosło szybki kres pięknej idei Wheelera, bo z powodów, których do dziś nikt dobrze nie rozumie, antymaterii jest w klatce na ludzi o wiele mniej niż materii. Pomysł Wheelera został więc porzucony. Taka piękna idea, a taki brzydki fakt...

Po zakończeniu pewnego odczytu dotyczącego nowej, rewolucyjnej teorii cząstek elementarnych głos zabrał Niels Bohr:

*Wszyscy zgadzamy się, że twoja teoria jest*
*szalona. Pytanie, czy jest ona wystarczająco*
*szalona, żeby miała szansę być prawdziwa?*

Skoro szalona teoria wszechświata z jednym elektronem Wheelera nie jest prawdziwa, to może dlatego, że nie jest w y s t a r c z a j ą c o szalona?

Pisałem o planecie cieni oraz o tym, że nie jest wykluczone, że nasza klatka na ludzi jest w pewien sposób „zamknięta". To znaczy, że poruszając się przed siebie, moglibyśmy po odpowiednio długim czasie powrócić do punktu wyjścia. Możliwy jest jednak także inny wariant, o którym n i e wspomniałem. Nie jest mianowicie wykluczone, że podróżując do przodu w czasie, czyli po prostu c z e k a j ą c, moglibyśmy w końcu powrócić do punktu wyjścia, czyli znaleźć się znów w przeszłości! W takim świecie wszystko wciąż by się wielokrotnie powtarzało i docierając do kresu przyszłości, bylibyśmy automatycznie przenoszeni do chwili początkowej. Oznaczałoby to cykliczne podróże wstecz w czasie. Ogólna teoria względności wcale nie wyklucza takiego scenariusza.

Może więc należałoby zastanowić się, jak wyglądałaby nasza klatka na ludzi, gdyby taki scenariusz n a p r a w d ę był realizowany? W tak zapętlonej rzeczywistości każdy obiekt wielokrotnie wracałby w czasie do swojej przeszłości i po każdym obiegu mógłby spotykać samego siebie. Kosmos musiałby więc być zapełniony wieloma identycznymi „kopiami" tych samych przedmiotów.

Czyż jednak nie jest tak, że nasza klatka na ludzi składa się z gigantycznej liczby i d e n t y c z n y c h protonów, neutronów, elektronów i jeszcze paru innych cząstek? Szacuje się, że w obserwowalnym wszechświecie znajduje się jakieś $10^{80}$ (czyli jeden z osiemdziesięcioma zerami!) elektronów. A może to jednak j e s t jeden i ten sam elektron, który tyle właśnie razy przeżył już cały wiek powtarzającego się w kółko wszechświata?

†††

Jak widać, mechanika kwantowa dostarcza całej masy interesujących obserwacji związanych z naturą czasu. Nie ustępuje jej teoria względności, o której też sporo zdążyliśmy powiedzieć. Wiemy już, że w wyniku ruchu z dużą prędkością zegary i wszystkie inne obiekty zaczynają starzeć się wolniej. Wiemy też, że jedną z właściwości pola grawitacyjnego jest to, że upływ czasu na znajdujących się w nim zegarach także spowalnia. Zadziwiającym wnioskiem wypływającym z teorii względności jest też to, jak podobne do siebie są pojęcia czasu i przestrzeni. A wydawać by się mogło, że czas i przestrzeń są tworami kompletnie różnymi. My przynajmniej w ten sposób je odczuwamy. W ramach teorii względności posługujemy się jednak pojęciem czasoprzestrzeni, którą można w dodatku kręcić hiperbolicznie poprzez ruch. Pokazuje

to, że z matematycznego punktu widzenia czas i przestrzeń są wielkościami bardzo do siebie podobnymi, nieomal identycznymi. Jest więc zadziwiające, jak skrajnie odmienna jest nasza percepcja związana z nimi. Czyżby była to kolejna iluzja tworzona przez nasz mózg?

Jednym z pojęć, które kompletnie zatracają sens w kontekście teorii względności, jest pojęcie „teraz". Zastanawiamy się czasem, cóż takiego porabia t e r a z ktoś będący daleko od nas. Mówiliśmy już, że pojęcie równoczesności zależy od ruchu obserwatora. Na przykład według kosmitów zamieszkujących bardzo odległą planetę, która oddala się od nas z pewną prędkością, Elvis Presley wciąż żyje na Ziemi. Sam fakt, że kosmici owi oddalają się od nas, modyfikuje ich pojęcie „teraz". Z kolei, według innych kosmitów zamieszkujących odległą planetę, która się do nas zbliża, w ich obecnym momencie to my sami już nie żyjemy. Są to niezbyt intuicyjne konsekwencje rewolucji pojęciowej, którą zaserwował nam Einstein.

Okazuje się jednak, że sytuacja jest jeszcze bardziej zagmatwana. Gdy mamy do czynienia z silnymi polami grawitacyjnymi zmieniającymi się w czasie, na przykład wówczas, gdy wokół wspólnego środka ciężkości szybko krążą dwie czarne dziury, pojęcie „teraz" w ogóle nie daje się nawet sensownie zdefiniować. Jeśli chcielibyśmy w pobliżu takich dwóch czarnych dziur zsynchronizować ze sobą trzy zegary leżące w pewnej odległości od siebie, natrafimy na fundamentalne trudności.

Jeśli ustawimy pierwszy i drugi zegar w taki sposób, by wskazywały równocześnie tę samą godzinę oraz zsynchronizujemy w podobny sposób zegar drugi z trzecim, okaże się, że pierwszy i trzeci zegar wcale nie będą wskazywać dokładnie tej samej godziny. Jest to jedna z konsekwencji ogólnej teorii

względności. Zatem pojęcie teraźniejszości, która podobno nigdy się nie kończy, nie daje się nawet przyzwoicie zdefiniować. Pojęcie „teraz" jest więc kolejną iluzją. I znów wychodzi na jaw, że podstawowe pojęcia, których używamy na co dzień, nie są w sposób fundamentalny przyzwoicie określone. Albert Einstein w jednym z listów pisał, że *różnica między przeszłością, teraźniejszością i przyszłością jest złudzeniem, choć przyznać trzeba, że złudzeniem uporczywym.*

# ROZDZIAŁ DWUNASTY

## *teoria kwantowa vs czarne dziury*

CODZIENNA TOALETA NA POKŁADZIE międzynarodowej stacji kosmicznej wiąże się z nierówną walką o zachowanie godności. Mniej więcej raz na tydzień należy zebrać wszystkie gromadzone z wielkim pietyzmem nieczystości, umieścić je we wspólnym pojemniku, a następnie całość wyrzucić za burtę, nie uroniwszy ani kropelki. Ten uroczy upominek od człowieka dla Kosmosu prędzej czy później trafi do ziemskiej atmosfery, w której za sprawą ogromnej prędkości i tarcia, rozgrzeje się do wysokiej temperatury i spłonie, pędząc po niebie. Warto o tym pamiętać, gdy patrząc na spadającą gwiazdę, wymyślamy życzenie.

Odkrywanie prawdy często prowadzi do rozczarowania. Szczególnie wówczas, gdy roimy sobie w głowach różne iluzje. Tak też było po pojawieniu się przełomowych odkryć XX wieku: teorii względności i mechaniki kwantowej. Z jakiegoś powodu teorie te, zamiast przynieść ukojenie naukowcom umęczonym poszukiwaniami prawdy, budziły głównie opór przechodzący chwilami w jawną wrogość. I nie inaczej będzie z powodu kolejnej rewolucji naukowej, która musi nastąpić prędzej czy później.

Panuje dość powszechne przypuszczenie, że teoria grawitacji, która znana jest jedynie w wariancie klasycznym, czyli nieuwzględniającym zjawisk kwantowych, powinna być zastąpiona

wersją obejmującą je w ten czy inny sposób. Powodów jest kilka. Jednym z nich są problemy pojawiające się w opisie czarnych dziur. Z einsteinowskiej teorii grawitacji wynika, że w samym środku czarnej dziury, w punkcie zwanym osobliwością, do której wpada cała materia pożerana przez czarną dziurę, załamują się wszystkie znane prawa fizyki. Po prostu leżą i kwiczą. Jest tak dlatego, że rozrywające wszystko na kawałki siły grawitacyjne stają się w pobliżu osobliwości nieskończone i żaden fizyczny obiekt nie byłby w stanie ich przetrwać. Nie bardzo wiadomo, co to oznacza i przypuszcza się, że uwzględnienie nieznanych zjawisk nieodkrytej jeszcze *kwantowej teorii grawitacji* powinno ów problem usunąć. Póki co, jest dla nas kompletnie niejasne, co takiego dzieje się w bezpośrednim otoczeniu owej osobliwości.

Ponadto podstawowym prawem mechaniki kwantowej jest prawo zachowania informacji, która nie może ani przepadać, ani pojawiać się znikąd. Natomiast losy informacji wpadającej do środka czarnej dziury są dość niejasne. W klasycznej teorii grawitacji informacja taka mogłaby po prostu zupełnie ginąć w czeluściach osobliwości, co stoi w ostrej sprzeczności z fundamentami teorii kwantowej.

Jest też inna zagwozdka. Każde ciało posiadające masę jest źródłem grawitacji, czyli zakrzywienia czasoprzestrzeni. Dla większości ciał efekt ten jest niewielki, ale nawet jabłko odrobinę zakrzywia czasoprzestrzeń wokół siebie (natomiast w przypadku czarnych dziur efekt ten jest ekstremalny). Ale co by się stało, gdyby umieścić takie „grawitujące” jabłko (albo jakiekolwiek inne ciało) w stanie kwantowej superpozycji dwóch różnych położeń? Czyli gdyby sprawić, żeby znalazło się ono jednocześnie tu i tam, jak foton rozszczepiony na szklanej płytce? Czy wtedy cała czasoprzestrzeń będzie również występować w superpozycji swoich

dwóch różnych wariantów? Takich, że czasoprzestrzeń zakrzywiona jest albo tu, albo tam? I czy w takiej sytuacji czas w danym miejscu będzie upływał wolniej i szybciej naraz? I jeśli tak, to cóż to w ogóle oznacza? W jaki sposób opisywać tak osobliwy stan czasoprzestrzeni? Są to wszystko pytania, na które naga małpa nie potrafi obecnie odpowiedzieć. Ale oczekuje się, że odkryta kiedyś teoria kwantowej grawitacji pozwoli nam to zrobić, jednocześnie zmieniając nasze pojmowanie zjawiska czasu i przestrzeni. A gdy wreszcie uda się ową kwantową grawitację odkryć, zapewne po raz kolejny nie zabraknie rozczarowanych i obrażonych na rzeczywistość.

Niedawno moi znajomi z Wielkiej Brytanii wpadli na bardzo chytry, a jednocześnie bardzo prosty sposób eksperymentalnego sprawdzenia, czy czasoprzestrzeń wokół ciała umieszczonego w superpozycji dwóch różnych położeń będzie również w superpozycji dwóch swoich wariantów. Co więcej, w perspektywie kilku lub kilkunastu lat powinno udać się wykonać eksperyment, który to zbada.

Tymczasem różne próby „kwantowania" grawitacji kończą się albo przewidywaniami teoretycznymi, które są w skrajnej sprzeczności z doświadczeniem, albo są matematycznie zbyt trudne do okiełznania. A nawet jeśli udaje się tego typu hipotetyczne teorie formułować, to ich przewidywania daleko wykraczają poza obszar możliwy do przetestowania. No i nie jest jasne, czy są to jeszcze teorie fizyczne, czy raczej matematyczne abstrakcje. Jak już wspomniałem wcześniej, zamiast obchodzić stulecie odkrycia ogólnej teorii względności, które niedawno przypadało, przyzwoiciej byłoby celebrować stulecie nieodkrycia kwantowej teorii grawitacji. Sytuacja jest więc dla fizyków zajmujących się fundamentalnymi teoriami dość kłopotliwa, bo bez danych

doświadczalnych nie pozostaje nam zbyt wiele, poza kontemplowaniem ciepłej wody w kranie.

†††

Jeśli na moment zapomnieć o grawitacji, czarnych dziurach, zakrzywionych czasoprzestrzeniach i tym podobnych zagadnieniach kosmologicznych, sprawy mają się nieźle. W zasadzie każde zjawisko zachodzące na Ziemi oraz każdy dotychczas przeprowadzony w laboratoriach eksperyment da się przecież wyjaśnić na gruncie najbardziej fundamentalnej teorii fizycznej, jaką znamy – *kwantowej teorii pola*. Jest to udoskonalona wersja mechaniki kwantowej, uwzględniająca efekty związane ze szczególną teorią względności. Co prawda, cała masa podstawowych pytań pozostaje wciąż bez odpowiedzi, do tego jeszcze wrócimy. Ale potrafimy przecież precyzyjnie przewidywać wyniki w zasadzie każdego przeprowadzanego eksperymentu, a to przecież chyba nie byle co?

Kwantowa teoria pola opisuje rzeczywistość w mikroskopowej skali, w której królują pojedyncze kwantowe cząstki tworzące wszystko, co znamy. Jak zdążyliśmy się przekonać, opis ten potrafi być dość daleki od naszych naiwnych wyobrażeń o świecie. Mówiąc bardzo delikatnie. Pisałem na przykład o pojedynczych cząstkach potrafiących być w wielu miejscach naraz i zdarzeniach, które nie mają przyczyny. Nawet najprostszy ruch cząstki kwantowej z punktu *A* do punktu *B* okazał się sumą nieskończenie wielu skomplikowanych procesów, w których cząstka podróżuje wszystkimi możliwymi drogami. Poszczególne drogi ze sobą interferują, w wyniku czego odnosimy wrażenie, że cząstka porusza się po prostej linii. Mogłoby się wydawać, że jest to szczyt absurdu.

No to teraz dopiero zobaczymy, na co stać naszą klatkę na ludzi. Ziemia drży, szyszki spadają.

Cząstki elementarne oddziałują ze sobą i nie jest to zwykłe przyciąganie czy odpychanie. Cząstki elementarne potrafią zamieniać się jedna w drugą albo „rozpadać się" na inne cząstki. Posłużyłem się cudzysłowem, bo cząstki elementarne nie posiadają żadnej wewnętrznej struktury, nie pękają zatem na kawałki, bo żadnych kawałków w środku nie mają. Chociażby dlatego, że nie ma w nich żadnego „środka" w środku. Natomiast cząstki elementarne potrafią znikać, a w ich miejsce natychmiast pojawiają się inne elementarne cząstki.

Czy kogoś jeszcze zaskoczy, jeśli powiem, że wszystkie te rzeczy dzieją się w sposób niedeterministyczny, czyli w fundamentalnie losowych chwilach? O ile oczywiście taką cząstkę będziemy obserwować, bo jeśli nie, to jednocześnie się ona rozpadnie i nie rozpadnie... W tym samym sensie, w jakim foton jednocześnie odbijał się od kawałka szkła oraz przełaził na drugą stronę. Czyli po staremu: na dwoje kwantowa babka wróżyła. Jeśli natomiast elektron spotka się ze swoją antycząstką – pozytonem, oba ulegną anihilacji, czyli przepadną w nicości, zmieniając się w dwa lub więcej fotonów.

Dlaczego muszą być dwa fotony lub więcej, a nie wystarczy jeden? Powód jest dość prosty. W układzie odniesienia, w którym tuż przed zderzeniem cząstka porusza się w prawo, a antycząstka w lewo z tą samą prędkością, ich łączny pęd wynosi zero. Więc gdyby po ich zniknięciu miał pojawić się tylko jeden foton, jego pęd musiałby wynosić zero, a to niemożliwe, bo foton zawsze się jakoś porusza (z prędkością światła zresztą). Czyli muszą być dwa fotony albo więcej, nigdy jeden, bo byłby kłopot z zasadą

zachowania pędu. Inny ciekawy proces to kreacja pary, gdy z dwóch fotonów powstaje nagle para cząstka-antycząstka.

A teraz obiecana niespodzianka. Scenariusz, w którym jakaś najprostsza cząstka, poruszając się z *A* do *B*, wybiera naraz wszystkie możliwe drogi, jest tylko bardzo uproszczoną wersją całej historii. Do tego dziwnego ruchu wzdłuż najróżniejszych fikuśnych dróg dochodzi jeszcze możliwość, że poruszająca się cząstka rozpadnie się po drodze na inne cząstki, które tuż przed końcem procesu znikną, przywracając do życia pierwotną cząstkę. Dzieje się to na każdej możliwej trajektorii, w każdym możliwym wariancie i z dowolną liczbą pośrednich procesów. I wszystkie te rzeczy dzieją się n a r a z. Istny cyrk. A jednak wykonując obliczenia, które porównywane są z eksperymentami, należy wszystkie te ewentualności uwzględnić. Bo w przeciwnym razie wynik obliczeń za nic nie będzie chciał się zgodzić z wynikami eksperymentów.

To jednak wciąż nie wszystko. Wydawać by się mogło, że zachowaniem cząstek rządzą pewne fundamentalne prawa, takie jak zasada zachowania energii. Przed chwilą wspomniałem też o zasadzie zachowania pędu, która zabraniała powstania jednego fotonu z dwóch anihilujących cząstek. Okazuje się, że zasady te są spełnione, ale tylko wtedy, gdy zachowanie cząstek jest obserwowane. Gdy nikt nie „patrzy" i cząstki mogą robić, co chcą, zaczynają się zachowywać w taki sposób, jak gdyby w trakcie swojej ewolucji zamieniały się po drodze we wszystko, w co się tylko da, niekoniecznie zachowując po drodze energię i pęd. Rozważając nawet najprostszy ruch cząstki z punktu *A* do punktu *B*, trzeba na przykład uwzględnić ewentualność, że tuż obok wykreuje się znikąd dodatkowa para cząstka-antycząstka, bezczelnie łamiąc zasadę zachowania energii. Lecz tuż przed obserwacją para ta z powrotem zanihiluje w nicość. A zatem nie zostanie na swojej

bezczelności przyłapana. Owa chwilowa kreacja dodatkowej pary będzie mieć jednak obserwowalny wpływ na ruch pierwotnej cząstki „z *A* do *B*". Nie uwzględniając w obliczeniach takiego procesu, otrzymamy wynik niezgodny z doświadczeniem.

Wszystko to dzieje się dlatego, że w kwantowej teorii pola pusta przestrzeń przemierzana przez cząstkę wcale n i e jest zwykłą nicością. Jeśli wyobrazimy sobie, że usunęliśmy ze świata całą materię oraz światło, wówczas to, co pozostanie, nazywane *próżnią kwantową,* posiada bardzo bogatą strukturę. Przez cały czas zachodzą w niej najprzeróżniejsze procesy, takie jak kreacje i anihilacje par. Procesy te nazywają się *fluktuacjami próżni*. Nie można ich zaobserwować w sposób bezpośredni, dlatego nazywa się je *procesami wirtualnymi*, jednak cząstka kwantowa poruszająca się poprzez kwantową próżnię z całą pewnością będzie je odczuwać.

Fluktuacje te prowadzą do całego szeregu konsekwencji, które daje się zaobserwować pośrednio. Na przykład dwa lustra, umieszczone w próżni kwantowej bardzo blisko siebie, zaczną się przyciągać. Okazuje się też, że fluktuacje próżni są na fundamentalnym poziomie odpowiedzialne za to, że przedmioty, takie jak żarówka, w ogóle mogą świecić. Zgodnie z kwantową teorią pola, pojedynczy atom wchodzący w skład świecącego w żarówce włókna potrafi wyemitować pojedynczy foton i robi to w sposób spontaniczny. Ale proces taki możliwy jest tylko wtedy, gdy uwzględni się istnienie efektów fluktuującej próżni kwantowej.

Kwantowa teoria pola dostarcza więc matematycznego opisu rzeczywistości zadziwiająco zgodnego z obserwacjami. Osiągając oszałamiającą precyzję przewidywań, czasem nawet do kilkunastu miejsc po przecinku. Gdybyśmy chcieli równie dokładnie mierzyć rozmiar Polski, musielibyśmy robić to z dokładnością do grubości ludzkiego włosa. Byłoby zatem nietaktem kwestionować tę teorię

tylko dlatego, że wydaje nam się ona d z i w n a. A jednak opisowi rzeczywistości dostarczanemu przez kwantową teorię pola trudno w ogóle nadać jakąkolwiek zdroworozsądkową interpretację. Nawet mówienie o tej teorii potocznym językiem, którego w tej książce używam, jedynie w dość mglistym zarysie oddaje jej zwulgaryzowany sens. Więc nie ma co się dziwić, że ulubiona interpretacja kwantowej teorii pola, wyznawana przez wielu fizyków, to interpretacja: z a m k n i j s i ę i l i c z.

Wizja świata oferowana przez kwantową teorię pola, oprócz tego, że frapująca, wydaje się na pierwszy rzut oka mocno skomplikowana. Okazuje się jednak, że to tylko pozory. Zbiór znanych nam podstawowych reguł gry, którym podlega klatka na ludzi w skali mikro, dałby się zmieścić na jednej kartce papieru. Nawet instrukcja obsługi pralki jest obszerniejsza. Może trochę przesadzam, ale tylko trochę.

Jedna z podstawowych zasad kwantowej teorii pola mówi: wszystko, co nie jest zabronione, jest dozwolone. Zasadnicza trudność polega więc na tym, by znaleźć i uwzględnić w obliczeniach wszystkie historie, które m o g ą się przydarzyć podróżującej cząstce. Lub innemu ewoluującemu obiektowi kwantowemu. Bo jeśli mogą, to się przydarzą. A możliwości jest mnóstwo. W zasadzie jest ich nieskończenie wiele.

Choć występuje też wśród nich pewna hierarchia. Niektóre procesy mają większy wpływ na losy cząstki, inne nieco mniejszy, a jeszcze inne mogą być niemal całkiem pominięte. W zależności od tego, jak precyzyjne mają być nasze obliczenia, należy uwzględnić więcej lub mniej procesów, które mogą wydarzyć się po drodze.

†††

Kwantowa teoria pola przewiduje jeszcze kilka innych smakowitych właściwości naszego świata. Cała z n a n a n a m rzeczywistość zbudowana jest z elementarnych cegiełek materii, zachowujących się dość kontrowersyjnie. Okazuje się, że każda cząstka może należeć do jednej z dwóch podstawowych kategorii. Pierwsza kategoria – *bozony*, to wszystkie cząstki, które po obróceniu wokół dowolnej osi o pełny kąt 360 stopni powracają do punktu wyjścia. Czyli nic szczególnego, bo dokładnie tak zachowują się wszystkie znane nam obiekty. But obrócony o 360 stopni to dokładnie taki sam but, co przed obrotem. Gdyby ktoś zapytał nas, czy but trzymany w ręku został przed momentem obrócony o pełny kąt, nie bylibyśmy w stanie tego nijak stwierdzić, prawda? Bozony nie szargają więc nadmiernie naszym poczuciem przyzwoitości.

Kwantowa teoria pola przewiduje jednak, że mogą także istnieć cząstki należące do drugiej kategorii, zwane *fermionami*. A z nimi jest nieco weselej. Otóż dowolny fermion, obrócony o pełny kąt, wcale nie powróci do punktu wyjścia, lecz będzie wyglądać w pewnym sensie o d w r o t n i e. To znaczy jego stan kwantowy zmieni się na przeciwny. Aby otrzymać stan wyjściowy, należałoby obrócić fermion o kolejne 360 stopni, więc nie zmienia się on dopiero przy obrotach o 720 stopni. Co więcej, gdybyśmy trzymali w ręku fermion, nie ma znaczenia, czy obrócimy go o pełny kąt, czy po prostu s a m i obejdziemy go dookoła. Efekt będzie ten sam: stan fermionu ulegnie odwróceniu. To właśnie mówi kwantowa teoria pola. A w zasadzie nawet zwykła mechanika kwantowa uwzględniająca efekty teorii względności. Gdyby więc but był fermionem, moglibyśmy jednoznacznie stwierdzić, czy został przed momentem obrócony o 360 stopni, porównując go z drugim, nieobróconym butem. No dobrze, ale czy fermiony w ogóle

istnieją? Może po prostu w teorii mogłyby istnieć, ale z jakichś powodów są na tyle uprzejme, żeby nie zawracać nam sobą głowy?

Niespodzianka: fermiony nie dość, że istnieją, to tworzą nasze organizmy! Wszystkie elektrony, neutrony oraz protony (a także kwarki wchodzące w skład neutronu i protonu) to właśnie fermiony! Znaczy to, że każda cząstka elementarna, z której nas wykonano, zmienia się po obrocie o 360 stopni. Na potwierdzenie tego dziwnego przewidywania przeprowadzono całą masę eksperymentów, chociażby z neutronami, które w całej rozciągłości potwierdzają to, co powiedzieliśmy. Jak już wspomniałem, wszystkie, nawet najbardziej ekscentryczne i z pozoru absurdalne przewidywania kwantowej teorii pola, są w stu procentach zgodne ze wszelkimi znanymi eksperymentami wykonywanymi na cząstkach elementarnych. Żeby było jasne, fizyków wcale taki stan rzeczy nie bawi. To znaczy, może trochę. Jest jednak cała masa pytań, na które kwantowa teoria pola nie potrafi obecnie odpowiedzieć. A dopóki nie wykryjemy w niej doświadczalnie żadnej dziury, nie będziemy mieli przesłanek do skonstruowania nowej, lepszej teorii rzeczywistości, która, być może, pozwoli zrozumieć nam więcej.

†††

Gdyby omówione dotąd właściwości kwantowych cząstek podsumować, otrzymalibyśmy następującą charakterystykę. Zachowują się nieprzewidywalnie, a wręcz niedeterministycznie. Rozpadają się w sposób spontaniczny. Potrafią być w wielu miejscach równocześnie i mieć naraz różne energie, o ile ich nie obserwujemy. Bo jeśli oglądamy je naszymi przyrządami, to lokalizują się tylko w jednym konkretnym miejscu lub ich energia

staje się jednoznaczna. Mają swoich towarzyszy, zwanych antycząstkami, które zachowują się jak zwykłe cząstki, lecz poruszające się wstecz w czasie. Do tego wszystkiego, jeśli niektóre z tych cząstek obrócimy o 360 stopni, ich stan ulega odwróceniu. Takimi właśnie obiektami wymoszczona jest cała klatka na ludzi, w której się znaleźliśmy.

Cały ten bagaż pojęciowy n i e został przez naukowców przyjęty po dobroci. Przedstawiony opis świata jest radykalnie odmienny od tego, co sądzono na jego temat jeszcze w XIX wieku. Fizycy więc bronili się kłami i pazurami przed zaakceptowaniem tak abstrakcyjnego stanu rzeczy. Większość wymienionych przewidywań została empirycznie zaobserwowana i fizycy zostali niejako z m u s z e n i, wbrew swej woli, do pogodzenia się z rzeczywistością. Pomimo dziesiątek tysięcy eksperymentalnych prób, nikomu nie udało się uzyskać choćby jednego doświadczalnego wyniku, który podważałby teorię względności bądź teorię kwantową. Jest oczywiste, że pierwsza osoba, która zdoła wykonać taki eksperyment, ma Nagrodę Nobla w kieszeni. Bowiem za skuteczne kontestowanie *status quo* w fizyce się nagradza, a nie ekskomunikuje, jak w religii.

No to wyobraźmy sobie teraz, co by było, g d y b y w kształtowaniu naszej wiedzy o świecie jedynym kryterium była ślepa w i a r a w to, co nam się podoba albo wydaje. Powinno być już dość jasne, dlaczego przez tysiąclecia istnienia ludzkości przed pojawieniem się metody naukowej jakikolwiek postęp musiał być z gruntu homeopatyczny.

A o najprzedziwniejszym efekcie kwantowym jeszcze nawet nie wspomnieliśmy. Gdy w 1988 roku umierał Richard Feynman, powiedział, że *umieranie jest strasznie nudne i liczy, że nie będzie musiał tego robić dwa razy*. Bo rzeczywiście, zaprzątały go w tym

czasie ciekawsze sprawy. W swoim uniwersyteckim pokoju Feynman zostawił tablicę zapisaną różnymi notatkami. Było tam na przykład odręcznie zapisane polecenie: *nauczyć się rozwiązywać każdy problem, który został rozwiązany.* Ale była też lista konkretnych zagadnień „do nauczenia". Wśród nich znajdował się tak zwany *efekt Unruha*, odkryty kilkanaście lat wcześniej.

Zdarzyło mi się wracać z pewnej konferencji naukowej razem z Billem Unruhem, odkrywcą efektu nazwanego jego nazwiskiem. Unruh ma w zwyczaju drzemać w czasie wielu konferencyjnych wystąpień, szczególnie tych nudnych. Mój znajomy w trakcie swojego referatu obudził Unruha, mówiąc karcącym tonem: ej, gościu, mówimy o t w o i m efekcie! W każdym razie jechaliśmy z Unruhem we dwóch taksówką i rozmawialiśmy między innymi o epizodzie z Feynmanem. I o tym, że Feynman chciał nauczyć się efektu Unruha, lecz nie zdążył. Unruh powiedział mi w swoim stylu, z nieco złośliwym uśmiechem, że kiedyś już t ł u m a c z y ł wszystko Feynmanowi, lecz ten najwyraźniej nie zrozumiał...

No cóż, efekt Unruha jest zazwyczaj sporym zaskoczeniem nawet dla wytrawnych fizyków. Jest to jedno z tych zjawisk, które pojawiają się na styku dwóch najciekawszych teorii fizycznych znanych nagiej małpie: kwantowej teorii pola i ogólnej teorii względności. Jeśli chodzi o tę ostatnią, czyli einsteinowską teorię grawitacji, znamy wiele jej konsekwencji, które dają o sobie znać w świecie makroskopowym, jak chociażby to, że czas w polu grawitacyjnym spowalnia. I tak dalej... A jaka jest rola grawitacji w mikroskopijnym świecie kwantowym? Szczerze pisząc, nie bardzo wiadomo. Potraktowanie grawitacji jak każdej innej siły, czyli wtłaczanie jej w ramy kwantowe w standardowy sposób, wiedzie na manowce. Tak stworzona kwantowa teoria grawitacji prowadzi

bowiem do przewidywań dramatycznie sprzecznych z rzeczywistością.

Istnieje kilka innych wariantów teorii kwantowej grawitacji, które nie są w oczywisty sposób błędne, lecz nie do końca wiadomo, czy w ogóle mają jakikolwiek związek z rzeczywistością. A nie ma jak tego sprawdzić, bo niezbędne do tego eksperymenty są zbyt trudne do wykonania. Przynajmniej w przewidywalnej przyszłości. Do tego owe warianty są tak bardzo zagmatwane, że nikt nie ma nawet całkowitej pewności co do ich matematycznej spójności. Kilku moich kolegów z piętra zajmuje się na przykład tworzeniem i rozwijaniem jednej z odmian kwantowej grawitacji, tak zwaną *grawitacją pętlową.* Inna droga, którą podąża liczne pogłowie fizyków, wiedzie poprzez tak zwaną *teorię strun.* Ponieważ nie ma doświadczalnych przesłanek przemawiających za którąkolwiek z tych teorii, a jeśli już, to są to raczej przesłanki wykluczające, to decyzja o zajmowaniu się rozwijaniem tych teorii jest w dużej mierze kwestią gustu. Jedni lubią drinki z palemką, a inni malować paznokcie.

Jeśli wierzyć w zasadę równoważności Einsteina, mówiącą, że działanie sił grawitacyjnych jest w niewielkich obszarach nieodróżnialne od efektów przyspieszenia całego układu, to grawitacja niezbyt by się różniła od siły działającej na pasażerów autobusu, który gwałtownie zahamował. A skoro tak, to „kwantowanie grawitacji" oznaczałoby poszukiwanie kwantowego opisu pozornej siły w hamującym autobusie. Czy to znaczy, że w takim autobusie biedni pasażerowie lecą na twarz, bo uderzył w nich strumień *grawitonów*? Czyli hipotetycznych cząstek kwantowych związanych z grawitacją? Diabli wiedzą. Raz jechałem w Warszawie autobusem, którego kierowca ewidentnie się spieszył,

a jakiś dziadzio nie wytrzymał i ryknął do kierowcy: panie, świnie pan wieziesz?! Ten mu odpowiedział: a co, ryj przycięło?

†††

Jest dobrze, ale nie beznadziejnie. W głowie młodego doktoranta, Stephena Fullinga, zrodził się bowiem p o m y s ł, który pozwolił przełamać impas. Pomysł ten został podchwycony i wykorzystany przez Stephena Hawkinga, który na tej podstawie napisał pracę o *promieniowaniu czarnych dziur*, a ta przyniosła mu światowy rozgłos. Na tym samym pomyśle opiera się efekt Unruha, o którym za moment.

Pewien znajomy brytyjski profesor wyrażał się dość złośliwie o swoich kolegach z Oksfordu, mówiąc, że im wszystkim wydaje się, że Oksford leży w samym p ę p k u wszechświata. A przynajmniej w centrum naszej galaktyki. Zapominają oni jednak, że w centrum galaktyki znajduje się gigantyczna czarna dziura, która wszystko p o c h ł a n i a, a niczego nie e m i t u j e.

Dokładnie takie są właściwości czarnych dziur przewidywane przez einsteinowską ogólną teorię względności. I właśnie dlatego, że niczego one nie emitują, mówi się o nich, że są c z a r n e. A co, jeśli wziąć pod uwagę zjawiska kwantowe? Hawking pokazał, że uwzględnienie ich w obliczeniach prowadzi do nowego efektu. A mianowicie do tego, że dzięki fluktuacjom próżni z okolic czarnej dziury muszą uciekać na zewnątrz cząstki kwantowe. Zupełnie jakby czarna dziura nimi pluła na wszystkie strony. Zjawisko to, znane jako *promieniowanie Hawkinga,* najprawdopodobniej prowadzi do stopniowego kurczenia się czarnej dziury, która prędzej czy później całkowicie wyparowuje.

Więc czarne dziury nie są a ż t a k czarne, jak by się mogło wydawać, bo czymś jednak „świecą". Może więc i z Oksfordu może czasem wyjść coś dobrego. Mnie na przykład naprostowały się tam koślawe buty.

Kiedy byłem jeszcze doktorantem, dostałem nieoczekiwany telefon od pewnego bardzo znanego fizyka. Nigdy wcześniej osobiście gościa nie poznałem, nie sądziłem, żeby o mnie słyszał, więc zdziwiło mnie, że do mnie dzwoni. Okazało się, że ma dla mnie propozycję kilkuletniej współpracy. Tłumaczę mu jednak, że nie skończyłem jeszcze doktoratu, więc nie mogę nigdzie pracować. Ale on na to, że nie szkodzi, bo doktorat mogę sobie dokończyć u niego, a w międzyczasie moglibyśmy zrobić coś ciekawego.

Propozycja zabrzmiała tajemniczo, więc pytam, co mu chodzi po głowie, ale on mi na to, że nie może powiedzieć. Ale żebym mimo wszystko przyjechał na parę dni, to pogadamy. Odparowałem, że nie będę leciał przez pół Europy, dopóki nie dowiem się, o co chodzi! Facet wreszcie się poddał i mówi: jedyne, co mogę teraz ujawnić, to że chcę zrobić s z t u c z n e czarne dziury w światłowodach i chciałbym cię włączyć w te badania. Tyle mi w zupełności wystarczyło!

Sprawa dotyczyła promieniowania Hawkinga, którego nie ma jak badać, bo nie mamy pod ręką żadnej czarnej dziury. Gość wpadł jednak na pomysł, by zachowanie czarnej dziury sprytnie zasymulować za pomocą impulsów laserowych. A pomysł był na tyle prosty, że łatwo byłoby komuś go ukraść. I stąd cały cyrk z pilnowaniem mojej dyskrecji. Doszło wręcz do tego, że od razu po przyjeździe na miejsce dostałem do podpisania cyrograf, że nikomu nie powiem, co usłyszałem.

†††

Tymczasem efekt Unruha jest jeszcze ciekawszy. Wyobraźmy sobie karetkę na sygnale, mijającą nas z dużą prędkością. Gdy karetka przejeżdża tuż obok, dźwięk sygnału nagle się obniża w charakterystyczny sposób. Początkowo karetka się do nas zbliża i wtedy wydawany przez nią dźwięk wydaje się wyższy, a tuż po wyminięciu karetka zaczyna się oddalać i wtedy słyszany dźwięk staje się niższy. Nazywa się to *efektem Dopplera.*

Bardzo podobnie zachowuje się światło, z tą różnicą, że wysokość dźwięku zastąpiona jest kolorem. Lampa albo cokolwiek innego, co świeci, zmienia kolor na bardziej niebieskawy, gdy zbliża się do nas. A gdy się oddala, kolor, który widzimy, robi się bardziej czerwonawy. Efektu tego używa się w astronomii do wyznaczenia prędkości, z jaką zbliżają się do nas albo oddalają gwiazdy. Wystarczy spojrzeć na kolor jakiejś gwiazdy i porównać go z paletą kolorów Słońca. Niektórzy twierdzą zresztą, że z tego samego powodu światła samochodów, które się do nas zbliżają, są białe, a samochodów, które się od nas oddalają – czerwone. Ha, ha, ha.

Efekt Dopplera dotyczy również pojedynczych fotonów. Dwoje (inercjalnych) obserwatorów, poruszających się względem siebie ze stałą prędkością i badających ten sam foton, będzie różnić się opinią na temat koloru owego fotonu. Według jednego, foton może być nieco bardziej czerwony, zaś zgodnie z pomiarami drugiego, foton może być bardziej niebieski. Oczywiście, każdy obserwator ma rację, bo kolor fotonu jest kwestią względną. Zupełnie jak jego położenie. Natomiast rzecz, która pozostaje niezmienna, to sam fakt, że ów foton istnieje w laboratorium i jest dokładnie jeden.

Sprawy się jednak komplikują, gdy obserwator zaczyna poruszać się z p r z y s p i e s z e n i e m. I tu dochodzimy do sedna. Okazuje

się, że dwóch obserwatorów poruszających się względem siebie ze zmienną prędkością nie tylko nie będzie zgadzać się w ocenie koloru i innych własności fotonu. Nie będą oni zgodni nawet co do l i c z b y obserwowanych fotonów! Skrajnym przykładem tego zjawiska jest efekt Unruha polegający na tym, że obserwator, poruszający się ruchem jednostajnie przyspieszonym poprzez p r ó ż n i ę kwantową, czyli przestrzeń tak pustą, jak to tylko możliwe, będzie w niej obserwować c z ą s t k i. I będą one równie realne, jak wszystkie inne cząstki, z których sam jest zbudowany! Jeśli spoczywający obserwator widzi ciemność (jak Jerzy Stuhr w „Seksmisji"), to ktoś przyspieszający w tym samym miejscu stwierdzi obecność cząstek, na przykład światła. Siwy dym!

Jeśli zdawało się nam, że cząstki kwantowe są pewnymi dziwnymi, trudnymi do zrozumienia obiektami, ale mimo wszystko, na swój osobliwy sposób i s t n i e j ą c y m i obiektywnie gdzieś w przestrzeni, to pudło. Okazuje się, że nawet istnienie bądź nieistnienie fotonu czy jakiejkolwiek innej cząstki jest także kwestią względną. Liczba cząstek zależy od tego, kto jest obserwatorem. Zupełnie jak prędkość autobusu, która według kierowcy wynosi zero (bo względem niego autobus wraz z przewożonymi świniami spoczywa), a według nieboraków czekających na przystanku jest różna od zera (choć wciąż niewystarczająca).

Kartezjusz, który w pewnym momencie życia zaczął we w s z y s t k o wątpić, doszedł do wniosku, że może być pewnym tylko jednego – że w ogóle istnieje. No bo czuł, że m y ś l i, a skoro myśli, to m u s i istnieć. *Cogito ergo sum.* Zdaje się, że pojedynczy elektron nie może być pewny nawet swojego istnienia.

Efekt Unruha ujawnia się dopiero pod wpływem przyspieszenia. Sama prędkość obserwatora, choćby nawet największa, nic nie daje.

W dodatku niezbędne do tego przyspieszenie musi być naprawdę gigantyczne. Pojawiających się w próżni cząstek jest tym więcej, im większe przyspieszenie obserwatora. Żeby cząstek tych było na tyle dużo, by dało się je realnie zaobserwować, musielibyśmy poruszać się z przyspieszeniami o wiele rzędów wielkości przekraczającymi to, do czego jesteśmy w stanie dobrnąć w codziennym życiu. Wszystkich tych efektów nikt jeszcze co prawda nie widział na oczy, ale można usiąść nad kartką i po dwóch godzinach obliczeń dojść do takich właśnie wniosków.

Człowiek umieszczony w przyspieszającej pionowo windzie odczuje pewną dodatkową siłę wciskającą go w podłogę. Ta „pozorna" siła nazywana jest *przeciążeniem*. Zwykły człowiek jest w stanie wytrzymać przeciążenie, które jest sześć razy większe od siły grawitacji wbijającej nas na co dzień w Ziemię. Czyli przeciążenie „6$g$". Powyżej tej bariery się mdleje, bo krew odpływa od mózgu. Rekordy są jednak po to, żeby je bić.

Rekord Guinnessa w przeciążeniu, które człowiek p r z e ż y ł (w sensie dosłownym), należy do Johna Stappa, który był również twórcą prawa (zwanego *prawem Murphy'ego*), mówiącego, że *jeśli coś może pójść źle, to z całą pewnością pójdzie*. Najwyraźniej prawo to znajduje zastosowanie do wszystkich, z wyjątkiem autora, bo przeżył on przeciążenie wynoszące 46$g$.

Pchła, odbijając się do skoku, doznaje przeciążeń na poziomie 300$g$. Można to oszacować, wiedząc, jak daleko skacze pchła, a zatem z jaką prędkością musiała się wybić. Oraz jak długa jest noga pchły, bo na tej właśnie długości pchła musi się rozpędzić do powyższej prędkości.

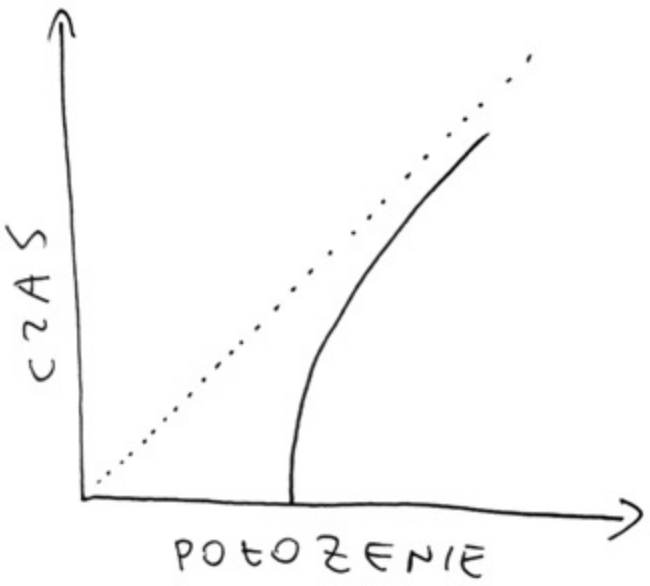
Szacuje się, że efekt Unruha staje się obserwowalny dla przyspieszeń nie mniejszych niż $10^{19}g$. Czyli wtedy, gdy

przyspieszając, waży się więcej niż na Ziemi o czynnik jeden z dziewiętnastoma zerami.

Nic dziwnego, że podobnie jak promieniowanie Hawkinga, również efekt Unruha wciąż czeka na ostateczną, doświadczalną weryfikację. Gdyby eksperymenty wykazały, że efekty te jednak n i e występują w przyrodzie, byłyby to pierwsze znane wyniki podważające przewidywania kwantowej teorii pola. A to zaskoczyłoby wszystkich chyba jeszcze bardziej niż sam efekt Unruha.

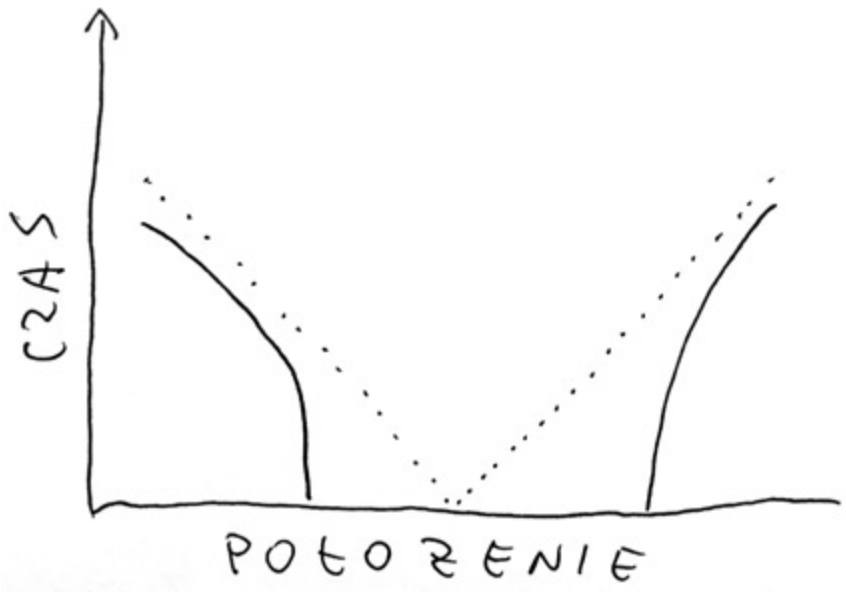
†††

To jeszcze nie wszystko! Stan kwantowy cząstek obserwowanych w próżni przez przyspieszającego obserwatora ma zadziwiające własności. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że jest to stan dość pospolity. Na przykład fotony obserwowane w efekcie Unruha przypominają światło, jakim świeci żarówka. Przy czym temperatura żarówki musiałaby wzrastać wraz ze wzrostem przyspieszenia obserwatora. Natomiast dla małych przyspieszeń temperatura ta musiałaby dążyć do zera, czyli „żarówka" po prostu by gasła, prowadząc do ciemności. A ciemność to nic innego, jak próżnia. Czyli wszystko się zgadza. Wychodzi więc na to, że obserwator przyspieszający z gigantycznym przyspieszeniem stwierdziłby, że pusta przestrzeń ś w i e c i, jakby była rozgrzana. Najlepsze jednak za moment.




Powróćmy do trajektorii ruchu jednostajnie przyspieszonego, o której była wcześniej mowa. Jest ona zaznaczona ciągłą linią na znanym nam już, powyższym obrazku (a linią kropkowaną zaznaczony jest horyzont zdarzeń).

Sytuacja robi się bardziej tajemnicza, gdy zadamy pytanie, co dzieje się, gdy próżnię kwantową bada nie jeden, lecz dwóch obserwatorów przyspieszonych poruszających się w przeciwnych kierunkach. W tej sytuacji każdy z obserwatorów posiada swój własny horyzont zdarzeń, jak przedstawia to powyższy rysunek. Domyślamy się, że każdy z nich zaobserwuje wokół siebie fotony. Okazuje się jednak, że jeśli nasi dwaj obserwatorzy są umieszczeni daleko od siebie, w taki sposób, że jeden znajduje się za horyzontem zdarzeń drugiego, jak na poniższym rysunku, wówczas dzieje się coś zaskakującego.




†††

Cząstki obserwowane przez tych dwóch obserwatorów w próżni za sprawą efektu Unruha będą ze sobą... s p l ą t a n e w sposób kwantowy! Czyli będą zachowywać się pod pewnymi względami tak, jak gdyby gadały ze sobą na odległość jak kwantowe buty.

Zwróćmy uwagę, że warunek przebywania obserwatorów poza wzajemnymi horyzontami zdarzeń oznacza, że obserwatorzy ci nie mogą w żaden sposób się ze sobą kontaktować. Są oni tak daleko od siebie, że komunikacja między nimi wymagałaby sygnałów poruszających się szybciej niż światło. A mimo to tajemnicze cząstki, wyłaniające się przed nimi z pustki w wyniku przyspieszania, są ze sobą jakoś kwantowo połączone. Zjawisko to nazywa się *splątaniem próżni kwantowej* i stanowi wciąż niezbyt dobrze zbadany temat. Jest to jednocześnie jeden z tematów badawczych, którym od kilku lat sam się zajmuję.

Ile jest splątania kwantowego w próżni? Jakie są jego własności i czy mogłoby ono posłużyć do wykonania czegoś pożytecznego, na przykład kwantowej t e l e p o r t a c j i? Są to pytania, na które znamy obecnie jedynie częściowe odpowiedzi. Jeśli chodzi o ten kierunek badań nad rzeczywistością, naga małpa na razie nie zabrnęła dalej.

# ROZDZIAŁ TRZYNASTY

## *jak się powiedziało A, trzeba powiedzieć Ą*

SŁYSZAŁEM O STUDENTCE, która z okazji zdanego egzaminu wręczyła kwiaty jednemu z profesorów. Ten jednak odburknął, że kwiatów to on nie pije. Każdy przedstawiciel społeczności akademickiej ma bowiem własne upodobania. Ja od kilku lat zajmuję się zagadnieniami leżącymi na styku teorii względności i teorii kwantowej. Gdybym miał w trakcie jazdy windą wyjaśnić, czym się zajmuję, powiedziałbym, że badam zjawiska takie, jak teleportacja kwantowa z okolic czarnej dziury. Czyli patrzę na wpływ najciekawszych aspektów ogólnej teorii względności na przebieg najdziwniejszych procesów kwantowych.

Parę lat temu napisałem ze swoim doktorantem oraz znajomym profesorem z Wielkiej Brytanii artykuł na temat idealnych zegarów. A konkretnie o tym, że istnienie takich urządzeń musi być jedynie przydatną fikcją. Tuż po publikacji informacja o naszej pracy trafiła jakimś cudem do codziennej prasy i stała się wiralowym hitem. Skrót artykułu ukazał się nagle w kilkuset gazetach, ja zaś przez tydzień byłem na tę okoliczność przepytywany przez dziennikarzy dzwoniących do mnie „na żywo" z najdziwniejszych miejsc na świecie.

Nasz artykuł był również najczęściej komentowanym wątkiem na największych forach popularno-naukowych. Przynajmniej

do czasu ukazania się trzy tygodnie później informacji o wykryciu fal grawitacyjnych pochodzących ze zderzenia pary czarnych dziur. Takie są właśnie w dzisiejszych czasach skutki opatrzenia artykułu naukowego frapującym tytułem...

W naszej pracy postawiliśmy pytanie, czy da się skonstruować tak zwany *zegar idealny*, i twierdziliśmy, wbrew większości podręczników ogólnej teorii względności, że n i e jest to możliwe. Aby powiedzieć, czym jest ów hipotetyczny zegar idealny, chciałbym najpierw powrócić do pytania, jak zachowuje się d o w o l n y zegar, jeśli porusza się ze stałą prędkością. Wyobraźmy sobie, że w jadącym pociągu umieścimy kilka zupełnie różnych zegarów: zegarek elektroniczny, zegar wahadłowy, zegar atomowy. Jak wspominaliśmy na początku, z perspektywy samobójcy leżącego na torach każdy z tych zegarów spowolniony zostanie o dokładnie ten sam czynnik, zależny od prędkości pociągu. Nawet bicie serca konduktora oraz tempo, w jakim rosną mu włosy na głowie, spowolnione zostaną o dokładnie tyle samo. To oczywiście przy założeniu, że konduktor ma serce i nie jest łysy.

A co z zegarami, które przyspieszają? Tutaj sprawa przestaje być oczywista. Weźmy choćby zegar wahadłowy. Przyspieszanie go spowoduje, że wahadło zacznie się bujać w innym tempie lub wokół innego położenia równowagi i cały zegar kompletnie się rozreguluje. To samo z niezwykle precyzyjnym zegarem atomowym, który jest skomplikowanym układem laserów podtrzymujących w powietrzu specjalnie dobraną grupkę atomów. Mniejsza o szczegóły, gdyż przyspieszenie całego laboratorium spowoduje, że lasery po prostu pospadają ze stołów i zegar spektakularnie rozwali się na kawałki.

Natomiast podręcznikowa definicja zegarów idealnych jest taka, że urządzenia te w ogóle nie są w żaden sposób zaburzane przez

przeciążenia, odmierzając czas zależący jedynie od chwilowej prędkości. Czas mierzony przez zegar idealny to tak zwany *czas własny*. Tego typu hipotetyczny, idealny zegar powinien przetrwać nawet najsilniejsze pola grawitacyjne, mierząc w nich grawitacyjną dylatację czasu i unikając przy tym zniszczenia lub jakiegokolwiek, nawet minimalnego, rozregulowania.

Najbardziej fundamentalnym i odpornym na wszystko zegarem jest rozpadająca się cząstka elementarna. Nie ma ona żadnej wewnętrznej struktury, więc nie ma jej jak popsuć, a można z niej zrobić przyzwoity zegar oparty na pomiarze średniego czasu rozpadu. Mając w słoiku dużą liczbę takich cząstek, możemy ocenić, ile czasu upłynęło, sprawdzając, ile jeszcze nierozpadniętych cząstek zostało w środku.

Wszystko pięknie, ale nawet tak prosty obiekt jak cząstka czuje wpływ przyspieszenia, więc marny z niej zegar idealny. Jeśli bowiem przyspieszymy ją w próżni, to przy odpowiednio dużych przyspieszeniach poczuje ona wokół siebie efekt Unruha, czyli obecność wszystkich rodzajów oddziałujących z nią cząstek. I oddziaływania te w sposób nieuchronny zmienią średni czas rozpadu, psując wskazania takiego „zegara". I to w zasadzie koniec bajki. Bo skoro nawet ten zegar rozreguluje się pod wpływem przyspieszeń, to podobnie będzie z każdym innym zegarem.

Oznacza to, że operacyjna definicja czasu kompletnie się załamuje dla odpowiednio dużych przyspieszeń albo silnych pól grawitacyjnych. Fizycy co prawda oczekują podobnego efektu wokół osobliwości czarnych dziur. My pokazaliśmy jednak, że kłopoty mogą się zacząć dużo wcześniej. I uniwersalne pojęcie czasu musi być jedynie fikcją, nabierającą tylko przybliżonego sensu, gdy przyspieszenia są tak małe, że nie widać efektu Unruha.

†††

Inny zaskakujący efekt, który niedawno badaliśmy z kolegami z Kanady i Hiszpanii, dotyczy własności pustych kwantowych pudełek. Okazuje się, że połowa pustego kwantowego pudełka wcale nie jest pusta! Gdyby więc król Salomon lepiej orientował się w prawach kwantowej teorii pola, mógłby bez trudu lać z próżnego.

Do wniosków tych doszliśmy, badając własności pudełek, których ścianki idealnie izolują wnętrze od całego świata zewnętrznego. Fizycy lubią nazywać takie pudełka *wnękami rezonansowymi* i często używają ich w eksperymentach. Jeśli usunąć ze środka całą zawartość, wewnątrz zostanie tylko kwantowa próżnia. Okazuje się jednak, że jeśli umieścić n a g l e w tej próżni dodatkową ściankę, która gwałtownie rozdzieli pudełko na połowy, pojawią się wewnątrz cząstki kwantowe. Co więcej, cząstki po jednej stronie ścianki będą kwantowo s p l ą t a n e z cząstkami po drugiej!

Z początku wydawało nam się, że źródłem tych cząstek i splątania jest po prostu oddziaływanie pustego pola kwantowego z pojawiającą się nagle ścianką. I oddziaływanie to po prostu k r e u j e cząstki i splątanie pomiędzy nimi. Aby to sprawdzić, wykonaliśmy obliczenia dla przypadku, w którym wewnątrz pustego pudełka gwałtownie pojawia się nie jedna, lecz d w i e nowe ścianki dzielące pudełko na trzy części.

Okazało się, że każda z nowych części również zawierałaby cząstki, lecz tym razem splątanie kwantowe występowałoby także pomiędzy dwoma skrajnymi fragmentami pudełka, oddzielonymi częścią środkową.

Istnieje pewne fundamentalne twierdzenie w teorii kwantowej, mówiące, że nie da się na odległość wytworzyć splątania pomiędzy

parą cząstek. Aby splątać cząstki, trzeba je umieścić blisko siebie, a najlepiej w tym samym miejscu. Ponieważ jednak ewidentnie wynikało z naszych rachunków, że cząstki ujawniające się w odległych fragmentach pudełka byłyby splątane, oznaczało to, że owo kwantowe splątanie nie zostało wcale s t w o r z o n e. Musiało ono być w jakiejś formie o b e c n e w pudełku od samego początku. Tylko niby gdzie, skoro pudełko było puste?

Okazuje się, że w samej próżni kwantowej! Próżni, która jest niezwykle skomplikowaną, fluktuującą strukturą. Gwałtowne umieszczenie przegrody wewnątrz jedynie owo splątanie u j a w n i ł o, nie tworząc go. Podobnie jest z kreowanymi cząstkami. W przypadku efektu Unruha przyspieszający obserwator stwierdzał obecność cząstek w próżni. Obserwator wcale tych cząstek nie tworzył. One tam w pewnym sensie już były od samego początku, lecz aby je zaobserwować, należałoby poruszać się z przyspieszeniem. Gdy zaś przyspieszało dwóch obserwatorów, obserwowane przez nich cząstki były splątane. Podobnie cząstki obserwowane w pustym pudełku, w wyniku wstawienia w nim dodatkowej przegrody, nie tyle są tam „tworzone", co raczej „ujawniane".

†††

Ze wspomnianymi pudełkami, czyli mówiąc bardziej uczenie „wnękami rezonansowymi", można robić jeszcze wiele innych frapujących rzeczy. Pewien szalony pomysł przyszedł nam kiedyś do głów, gdy z grupą angielskich fizyków zbyt długo lecieliśmy na konferencję i zrobiliśmy sobie z nudów burzę mózgów na pokładzie samolotu.

Zaczęliśmy się zastanawiać, czy można by przekształcać stan pola kwantowego zamkniętego wewnątrz pudełka, jeśli będziemy tym pudełkiem ruszać? Wiadomo, że ruch obserwatora z przyspieszeniem może zmienić stan obiektu kwantowego. A co z ruchem samego obiektu? Czy trzęsąc odpowiednio takim pudełkiem, umielibyśmy przekształcić jego kwantową zawartość w taki sposób, w jaki zrobiłaby to bramka kwantowa w komputerze kwantowym? A jeśli tak, czy umielibyśmy przeprowadzić choćby najprostsze obliczenia kwantowe wyłącznie poprzez ruch?

W przypadku algorytmów kwantowych najcenniejszym paliwem przydatnym w wielu zastosowaniach, takich jak teleportacja, jest splątanie kwantowe. Okazało się, że przyspieszony ruch naszego pustego pudełka może prowadzić do produkcji wewnątrz takiego splątania i mimo że efekt jest bardzo słaby, znaleźliśmy sprytny sposób, pozwalający wzmocnić go tak, by stał się obserwowalny. A to już nie byle co!

Pomysł był dość szalony, ale obliczenia pokazały, że w teorii byłby on możliwy do realizacji. Co jednak nie znaczy, że dałoby się go łatwo sprawdzić. Bo mimo że w teorii nie ma różnicy pomiędzy teorią a praktyką, to w praktyce jest.

Że ruch jest przydatny do przetwarzania informacji, wiedzą nawet pszczoły. Wracając do ula z nowo odkrytego pola kwiatowego, przekazują one innym pszczołom wiadomość o położeniu tego pola za pomocą złożonej kombinacji obrotów, nieco przypominających taniec. Poprzez odpowiedni dobór prędkości i kierunku ruchu pszczoły potrafią wskazać odległość od kwiatowego pola oraz jego położenie względem aktualnego położenia Słońca. Inne pszczoły potrafią tę informację nie tylko zapamiętać, ale praktycznie wykorzystać! W podobny sposób mogą one również ostrzec przed

niebezpieczeństwem albo nawet poprosić o umycie przez inne pszczoły. I zapewne umieją też mówić o wielu innych pszczelich sprawach, o których niewiele wiemy.

Nie tylko pszczoły posługują się nawigacją względem położenia Słońca. Wiele gatunków owadów porusza się, biorąc za punkt odniesienia Słońce albo Księżyc. Sposób działa niezawodnie, bo Słońce jest daleko i da się utrzymywać stały kurs w trakcie lotu, pilnując tylko, żeby Słońce było wciąż pod stałym kątem. Wszystko jednak się psuje przez człowieka, który stworzył wszędzie sztuczne źródła światła. Lot pod stałym kątem do ulicznej latarni kończy się dla owada spiralną trajektorią prowadzącą do światła.

†††

Trzy powyższe zagadnienia raczej nie znajdą szybkiego zastosowania, dajmy na to, w hutnictwie. Z całą moją sympatią dla branży metalurgicznej (mój tata był inżynierem projektującym pierwsze w Polsce huty aluminium), te projekty badawcze były realizowane wyłącznie po to, by lepiej zrozumieć kilka interesujących i nieintuicyjnych zagadnień. I jest to, jak sądzę, główna siła sprawcza w nauce. A jeśli przy okazji wynika z niej coś jadalnego dla pozostałych siedmiu miliardów nagich małp, jest to zaledwie pożyteczny efekt uboczny. I choć tylko nikły procent badań znajduje praktyczne zastosowania, to nawet ów drobny ułamek prowadzi do postępu technologicznego, nieporównywalnie większego niż z jakiegokolwiek innego źródła.

Mimo to, badania dotyczące konfrontacji zjawisk grawitacyjnych z teorią kwantową mogą wkrótce okazać się ważne również w praktyce. Bez uwzględnienia efektów ogólnej teorii względności nie byłaby możliwa precyzyjna komunikacja satelitarna. Nie

mówiąc już o wysyłaniu dokądkolwiek misji kosmicznych. Z drugiej strony, królujące dotąd w skalach mikroskopowych zjawiska kwantowe, dzięki którym zbudowano chociażby laser czy zegar atomowy, zaczynają panoszyć się w coraz większych skalach. Teleportacja kwantowa o zasięgu ponad stu kilometrów, kryptografia kwantowa uprawiana w komunikacji z satelitą – to już są fakty. Jest tylko kwestią czasu, zanim komunikacja w skali Układu Słonecznego stanie się w pełni kwantowa. Powinniśmy przedtem dobrze zrozumieć, jaki jest wpływ grawitacji na zjawiska kwantowe, bo inaczej cała ta inicjatywa może paść na twarz.

Jeden z większych projektów badawczych, który prowadziłem przez kilka ostatnich lat, oscylował wokół pytania, w jaki sposób kwantowe protokoły komunikacyjne, takie jak choćby teleportacja, ulegają zaburzeniu za sprawą grawitacji bądź przyspieszenia obserwatorów, którzy są w nie zaangażowani. Czyli mówiąc ludzkim głosem, co stanie się z teleportacją, gdy w pobliżu jest czarna dziura. Albo przynajmniej masywna gwiazda.

Okazuje się, że atakowanie tego problemu może prowadzić do gwałtownego zwiększenia populacji siwych włosów na głowie. Bo nawet samo poprawne s f o r m u ł o w a n i e jakiegokolwiek zagadnienia z tej kategorii jest mocno problematyczne. Nie mówiąc nawet o jego rozwiązaniu!

Efekt Unruha opisuje, co dzieje się z najprostszym do wyobrażenia stanem kwantowym – stanem próżni, gdy obserwowana jest ona przez przyspieszający detektor. I jest to jedno z niewielu zagadnień łączących ruch z przyspieszeniem ze zjawiskami kwantowymi, mających ścisłe rozwiązanie.

Przez trzydzieści lat nie były znane jakiekolwiek i n n e niż próżnia przykłady dające się rozwiązać. Choć wiadomo było, że niemal k a ż d y stan kwantowy ulega j a k i e j ś zmianie pod

wpływem przyspieszenia. Parę naście lat temu ludzie zakasali jednak rękawy i zaczęli to sprawdzać. Droga okazała się bardzo wyboista. W prowadzonych rachunkach stosowano najróżniejsze przybliżenia, które często okazywały się nieuzasadnione lub po prostu błędne. Czyniono je niemniej w nadziei, że pewne aspekty badanych zagadnień uda się mimo wszystko nieco naświetlić i, być może, odkryć lepszą drogę do prowadzenia obliczeń. Lub wpaść na mądrzejszy sposób sformułowania problemu. Trafiały się też poważne błędy koncepcyjne powodujące, że miejsce wielu z tych prac było tam, gdzie nie zaglądają filozofowie.

Ludzie najchętniej badali nie byle jakie stany, bo stany splątane par cząstek. Rozwiązanie tego problemu pozwoliłoby zrozumieć, co dzieje się z podstawowym surowcem większości znanych protokołów kwantowych, gdy któraś ze stron znajduje się w silnym polu grawitacyjnym. Jak pamiętamy, nawet do wykonania teleportacji kwantowej potrzebny jest stan splątany. I jest on w całej procedurze zużywany niczym paliwo. A jeśli ulegnie on wcześniej zniekształceniu w wyniku zewnętrznych czynników, jakość teleportacji kwantowej może ulec pogorszeniu. Oznacza to, że w tym przypadku przeteleportowany stan kwantowy nie będzie identyczny ze stanem, który był wysyłany, lecz pojawią się pewne błędy. Błędy te wywołałaby grawitacja.

Są to zagadnienia, którym w doborowym towarzystwie poświęciłem parę lat dociekań. No i udało nam się wreszcie znaleźć poszukiwany, ścisły opis tego, jak w pewnych sytuacjach grawitacja zaburza splątanie stanów kwantowych i jak w wyniku tego pogarsza się jakość teleportacji, gdy którakolwiek ze stron znajduje się w silnym polu grawitacyjnym. Wyniki opublikowaliśmy w cyklu prac. Któryś z moich dowcipnych studentów ochrzcił najbardziej opasłą z nich mianem *opus magnum.* I tak się przyjęło.

Pewnie dlatego, że brnięcie przez nią zabierało biednym studentom długie, zimowe wieczory...

Można powiedzieć, że obecnie m n i e j w i ę c e j rozumiemy już, co dzieje się z szeroką klasą stanów kwantowych, gdy poddawane są one wpływowi przyspieszenia. Wiadomo też, kiedy da się zaradzić niekorzystnym wpływom przyspieszenia i jak należy to robić. Wciąż jednak badania w tym zakresie są na bardzo wczesnym etapie i znamy jedynie kilka skromnych odpowiedzi na najprostsze pytania. Co gorsza, do opisu całej sytuacji stosujemy, podobnie jak Hawking i Unruh, liczącą ponad sto lat klasyczną teorię grawitacji Einsteina, licząc na to, że tak powstały schemat stanowi pewne przybliżenie nieznanej jeszcze nikomu kwantowej teorii grawitacji. Niektórym wydaje się, że badając ów schemat, uda się być może dowiedzieć c z e g o ś na temat granicznych właściwości grawitacji kwantowej i w ten sposób uczynić pewien postęp w drodze do jej odkrycia. Niestety, są to jedynie nadzieje, a jak jest naprawdę, póki co nie wiemy. Na moje oko w całym odkrywanym stopniowo alfabecie jesteśmy dopiero mniej więcej w połowie litery A. Ale skoro powiedziało się A, trzeba powiedzieć Ą.

# ROZDZIAŁ CZTERNASTY

## *nie znam się, to się wypowiem*

*BIEGA, KRZYCZY PAN HILARY:*
*„Gdzie są moje okulary?”*
*Szuka w spodniach i w surducie,*
*W prawym bucie, w lewym bucie.*

*Już podłogę chce odrywać,*
*Już policję zaczął wzywać.*
*Nagle zerknął do lusterka...*
*Nie chce wierzyć... Znowu zerka.*

*Znalazł! Są! Okazało się,*
*Że je miał na własnym nosie.*

To o nas! Parenaście tysięcy lat funkcjonowania cywilizacji nagiej małpy na kawałku kosmicznej skały. Wokół kręciło się Słońce, a Księżyc i inne twory podróżowały po niebie wielce skomplikowanymi epicyklami. Aż wreszcie w lustro spojrzał Kopernik, puknął się w głowę i wskazał palcem na koniec naszego nosa, na którym znajdowały się okulary.

Rzecz jasna, Kopernik nie udowodnił wcale, że Ziemia krąży wokół Słońca. Bo nie jest to rzecz dająca się udowodnić. Zwrócił

jednak uwagę, że opis wszystkiego, co rusza się po niebie, skrajnie się upraszcza, jeśli przyjąć za punkt widzenia układ związany ze Słońcem.

Powróćmy na moment na planetę cieni, o której była mowa kilka rozdziałów temu. Aby uzmysłowić mieszkańcom istnienie niewyobrażalnego, trzeciego wymiaru oraz tego, że ich planeta jest abstrakcyjnym, trójwymiarowym tworem, zwanym kulą, potrzebne byłyby połączone siły Kolumba i Kopernika.

Co ciekawe, hipoteza kuli pozwalałaby cieniom snuć dalsze przewidywania. Cieniom mogło się wcześniej zdawać, że cały obserwowalny wszechświat to płaska powierzchnia ich planety, a niczego poza nią już nie ma. Hipoteza trzech wymiarów oraz zanurzonej w nich kuli stwarza jednak wiele możliwości. A może w różnych miejscach niewyobrażalnej trójwymiarowej przestrzeni ukrywają się także i n n e kuliste planety? Czyli hipotetyczne „światy równoległe" zamieszkiwane być może przez istoty potrafiące poruszać się w t r z e c h wymiarach? Czyż to nie szokujące?

Ale klatka na ludzi to nie tylko fundamentalne składniki, z których zbudowane jest wszystko, co znamy. Choć dotychczas byliśmy skupieni raczej na tym. Klatka na ludzi to również bogactwo i złożoność struktur tworzących wszystko. Ponad 150 lat temu dokonana została obserwacja równie imponującego kalibru, co odkrycie Kopernika. Wszystko za sprawą prac Darwina i Wallace'a dotyczących źródeł różnorodności życia na Ziemi. Dwaj panowie podważyli ideę inteligentnego projektu stojącego za stworzeniem biologicznych mechanizmów tworzących życie. Zamiast tego Darwin i Wallace zaproponowali teorię o wiele bardziej prozaiczną i, co nie powinno nas już dziwić, skrajnie rozczarowującą.

Według obu twórców teorii ewolucji można wyjaśnić całą różnorodność ziemskiego życia bez powoływania się na jakiegokolwiek chytrego projektanta. Kluczowa jest tu elementarna obserwacja: organizmy, które lepiej o siebie dbają, mają większą szansę na spłodzenie potomstwa, które odziedziczy ich cechy. Na przykład osobniki mające ciągoty do rzucania się w przepaść mają zmniejszone szanse na przekazanie tej cechy swoim potomkom. Z logicznego punktu widzenia jest to niemal tautologia (czyli oczywista oczywistość), a jednak nikt przed Darwinem i Wallace'em na nią nie wpadł. W konsekwencji z puli wszystkich organizmów odsiewane statystycznie są te, których zachowanie niezbyt sprzyja skutecznemu przekazywaniu swoich cech dalszym pokoleniom. A od czasu do czasu pojawia się przypadkowo zachowanie bądź cecha, nieznana wcześniej, która czyni życie i rozmnażanie się łatwiejszym. Tego typu cechy rozprzestrzeniają się w populacji o wiele efektywniej niż inne, mniej sprzyjające pomyślności życia. Oznacza to, że każdy gatunek powinien podlegać powolnym zmianom. Powoli ewoluować ku lepszemu przystosowaniu do okoliczności.

No dobrze, ale ewolucja nie zaczęła się przecież wczoraj. Co w takim razie działo się wcześniej? Przez poprzednie dziesięć tysięcy lat? Przez poprzednie dziesięć milionów lat? Przez poprzednie parę miliardów lat? Przecież ewolucja musiała przebiegać przez cały ten, niewyobrażalnie długi czas. Trudno uniknąć wniosku, że dawne życie na Ziemi musiało być o wiele prymitywniejsze niż obecnie.

Hipoteza ta jest potwierdzona w niezliczonych znaleziskach archeologicznych. Rzeczywiście, ślad po ludziach urywa się kilkadziesiąt tysięcy lat temu. Jakiekolwiek ssaki znikają z naszej historii, jeśli cofniemy się w czasie o więcej niż dwieście milionów

lat. I tak dalej... Im głębiej szperamy w śladach przeszłości, tym prymitywniejsze formy życia w nich odnajdujemy.

Etap, na którym naga małpa znajduje się obecnie, jest również pewnym t y m c z a s o w y m, względnie prymitywnym stadium rozwoju. Za jakiś czas zostaniemy ewolucyjnie zastąpieni istotami, które dzielić od nas będzie przepaść o wiele większa, niż obecnie dzieli nas od mrówek. Zastanówmy się, co na temat świata mogłaby zakomunikować nam mrówka? Obawiam się, że my również nie potrafimy wypowiedzieć się w jakikolwiek sensowny sposób niemal w żadnej sprawie, jeśli tylko spojrzeć na to z odległej perspektywy. Mówienie z pewnością o czymkolwiek jest więc nie tylko bezczelnością, ale, co gorsza, nietaktem.

†††

Zresztą nie tylko ziemskie życie podlegało powolnym zmianom. Sama Ziemia również w tym czasie ewoluowała. Dla przykładu, w czasach dinozaurów doba trwała nie 24 godziny, a 18. Ziemia kręciła się więc szybciej. Jak to możliwe? Albo, formułując pytanie nieco sensowniej: co spowodowało, że obrót Ziemi wyhamował? Odpowiedź jest prosta acz zaskakująca: Księżyc. Księżyc, jak wiemy od czasów Newtona, odpowiada za powstawanie oceanicznych pływów. Bo grawitacyjnie przyciąga do siebie oceany, ciągnąc je za sobą. Te z kolei, poprzez tarcie o skorupę ziemską, spowalniają obrót całej planety. Ten słabiutki mechanizm, trwający jednak bardzo długo, okazał się wystarczająco skuteczny, by w ciągu kilkudziesięciu milionów lat wydłużyć dobę o połowę. Co więcej, proces spowalniania trwa nadal. Hamowanie obrotu Ziemi skończy się dopiero wówczas, gdy pełny obrót Ziemi wokół jej osi będzie trwał dokładnie tyle, ile trwa pełny obrót Księżyca wokół Ziemi.

Dopiero wtedy pływy oceaniczne kompletnie zanikną. Możemy się więc spodziewać, że w odległej przyszłości jedna ziemska doba będzie trwać mniej więcej tyle, co obecny miesiąc.

Jak by kto nie dowierzał, proponuję zerknąć na niebo, na którym wisi Księżyc. Z jakiegoż to powodu jest on zwrócony do nas zawsze tą samą stroną? Dokładnie z tego samego! Tylko że mniejszy od Ziemi Księżyc całą tę ewolucję zdążył już przebyć do końca. I jego obrót wokół własnej osi trwa dokładnie tyle, co obrót Ziemi wokół Księżyca (jeśli patrzeć z jego perspektywy). Efekt pływów występuje bowiem nawet wówczas, gdy na powierzchni nie ma żadnej wody. Wystarczy, że ziemska grawitacja choć odrobinę zniekształcała powierzchnię Księżyca, wybrzuszając ją ku sobie. Przecież bliższe nas fragmenty Księżyca przyciągane są do Ziemi nieco mocniej niż te dalsze. I ta właśnie różnica sił wywołuje pewne niewielkie pływy powierzchni Księżyca. Wystarczy tylko n i e c o poczekać...

Swoją drogą, Napoleon oraz wszystkie krowy na Ziemi zawdzięczają swoje ulubione ziemskie pole magnetyczne również Księżycowi. Pływy oceaniczne spowalniają bowiem obrót ziemskiej skorupy, ale płynne wnętrze naszej planety kręci się wciąż nieco szybciej, niczym żółtko wewnątrz hamowanej skorupki wirującego jaja. Wysuwane są różne hipotezy, że wytworzona w ten sposób różnica prędkości obrotowych produkuje we wnętrzu Ziemi prądy elektryczne generujące całą naszą magnetosferę. A to ona chroni ziemskie życie przed szkodliwym wpływem strumienia naładowanych elektrycznie cząstek emitowanych przez Słońce. Ów strumień, nazywany *wiatrem słonecznym,* zakrzywiany jest w polu magnetycznym Ziemi, które działa nań niczym tarcza ochronna. I jedynie w okolicy biegunów, na których pole magnetyczne wchodzi do wewnątrz Ziemi, wiatr słoneczny może penetrować

górne warstwy atmosfery. Zderzając się z nią, tworzy zorzę polarną. Gdyby więc nie magnetyczna tarcza Ziemi wytworzona dzięki Księżycowi, tutejsze życie byłoby nieustannie bombardowane zagrażającym mu wiatrem słonecznym.

†††

Początki życia na Ziemi musiały być trudne. Cała jej atmosfera zdominowana była przez jedną z najbardziej śmiercionośnych t r u c i z n, jakie można sobie wyobrazić: tlen. Z tego względu życie musiało formować się w głębinach oceanów, gdzie wpływ trującej atmosfery był najmniejszy. Gdy tylko jakaś żywa drobinka wystawiła nos nad powierzchnię wody – ulegała błyskawicznemu utlenieniu. Działo się to do momentu, gdy za sprawą przypadku pojawiły się w oceanach pierwsze komórki o d p o r n e na działanie złowieszczej substancji. Dzięki temu, po kilku miliardach lat pływania, życie mogło wypełznąć z wody.

Na bezrybiu i rak ryba – zamiast grymasić na trującą atmosferę, życie nauczyło się nie tylko przed nią bronić, ale także skutecznie z niej korzystać. I tak dobrze dostosowało się do panujących na powierzchni śmiercionośnych warunków, że dziś nie możemy się bez owego trującego tlenu w ogóle obejść. Jest on nam potrzebny do życia jak tlen.

Swoją drogą, to samo spotkało mnie, gdy po latach mieszkania za granicą zdecydowałem się wrócić na stałe do Polski. Wiedząc, jak bardzo nie lubię zimy i niskich temperatur, zacząłem szukać sposobu na uniknięcie cierpień, które nieuchronnie musiałyby mnie nękać przez trzy czwarte mojego nadchodzącego życia. Postanowiłem więc wybrać drogę ryb i zacząłem się zastanawiać, co mogłoby sprawić, że polubiłbym nowe, zimowe środowisko. W ten sposób zacząłem

jeździć na snowboardzie. Niestety, w wyniku tego posunięcia natychmiast przestałem lubić lato. To samo spotkało ryby, które wypełzły na powierzchnię Ziemi. Nauczyły się oddychać tlenem, lecz wkrótce zapomniały, jak pływa się w wodzie. Całemu procesowi towarzyszył niewyobrażalny wysiłek okupiony milionami rybich istnień, ale i nagroda była ogromna: skolonizowanie pustej planety i triumf genów sterujących tym wszystkim. Jeśli ludzkość miałaby jakoś odwdzięczyć się swoim rybim przodkom za ofiarność w walce o zdobywanie dla nas nowych przestrzeni życiowych, mamy tylko jedną możliwość: podbój Kosmosu.

†††

Od czasu odkrycia przez Watsona i Cricka struktury DNA wiemy, jaki mechanizm biochemiczny odpowiedzialny jest za dziedziczenie cech rodziców przez potomstwo. Jest on oparty na skomplikowanej instrukcji budowy organizmów tkwiącej wewnątrz każdej żywej komórki. Jednak mechanizm ewolucyjny nie potrzebuje akurat tego konkretnego nośnika. Zmian ewolucyjnych można się spodziewać w jakimkolwiek środowisku, w którym masowo kopiowana jest informacja. W ten właśnie sposób ewoluuje nasza własna kultura. Kultura, jak wiadomo, jest przeciwieństwem natury. Motywowana religijnie krytyka metody rozmnażania *in vitro,* jako czegoś nienaturalnego, jest równie uzasadniona w odniesieniu do innych nienaturalnych aspektów naszego życia. Takich jak noszenie okularów, jazda rowerem albo oglądanie w telewizji sztuki Shakespeare'a. Bo sztuka jest sztuczna – i nie jest to tylko przypadek leksykalny w naszym języku. *Art is artificial. L'art est artificiel. Kunst*

*ist künstlich. Искусство искусственное. Umění je umělé.* I tak dalej.

A jednak mechanizmy ewolucyjne i w naturze, i w kulturze są wspólne. Za sprawą przekazów ustnych, a później pisemnych ewoluowała cała ludzka cywilizacja, jej kultura, język i obyczaje. Jeśli jakaś grupa etniczna była przez dłuższy czas oddzielona od reszty – ewolucja jej języka postępowała czasem tak daleko, że wkrótce język ów stawał się kompletnie niezrozumiały dla reszty świata. Właśnie w ten sposób powstawały nowe języki. W identycznych procesach tworzą się nowe gatunki zwierząt. Jeśli fragment pewnej populacji zostanie w jakiś sposób odseparowany od reszty, na przykład za sprawą barier geograficznych, wówczas rozwija się on i ewoluuje samodzielnie, aż wreszcie ulegnie tak istotnym zmianom, że krzyżowanie go z pozostałą częścią pierwotnego gatunku przestanie być możliwe.

Rozwój ewolucyjny można też przyspieszyć poprzez wywieranie zewnętrznych wpływów. W ten właśnie sposób człowiek na własne potrzeby wyewoluował sobie pekińczyka oraz doga angielskiego, zaczynając od wilka schwytanego w dziczy. Szacuje się, że ewolucja ta trwała nie dłużej niż kilkanaście tysięcy lat. O ile jednak w ewolucji naturalnej kryterium doboru jest stopień przystosowania do środowiska i skuteczność rozmnażania w nim, to w wymuszonej ewolucji psa kryterium doboru był stopień służalczości lub względy estetyczne. Nie jest więc przypadkiem, że pies jest najlepszym przyjacielem człowieka. Tylko najbardziej przyjazne okazy miały szansę przeżyć u naszego boku, cała reszta przepadła marnie z ręki nieusatysfakcjonowanego hodowcy. Swoją drogą to chyba najlepszy przykład spektakularnej ewolucji gatunkowej, która od początku do końca przebiegała na oczach nagiej małpy.

Środowisko, w którym może zachodzić ewolucja, nie musi być wcale oparte na chemii. Nie sądzę, byśmy musieli jeszcze długo czekać na moment, w którym mechanizmy ewolucyjne zostaną zainicjowane w świecie wirusów internetowych. Granice pomiędzy życiem a śmiercią są raczej płynne. Pytanie, czy wirusy biologiczne należy zaklasyfikować jako materię ożywioną, jest wyłącznie kwestią formalnej definicji. Trudno bowiem w pewnych przypadkach „obiektywnie" stwierdzić, co żyje, a co nie. Podobnie jest z istniejącymi obecnie wirusami komputerowymi. Są to bowiem strzępki samoreplikującej się informacji, podróżujące w abstrakcyjnych czeluściach nośników danych. Nie ma tu fundamentalnej różnicy w porównaniu z wirusem biologicznym propagującym się za pośrednictwem złożonych konfiguracji cząsteczek chemicznych. A co za tym idzie, można wkrótce spodziewać się epidemii mutujących i coraz trudniejszych do opanowania wirusów elektronicznych i coraz wyższych, samoorganizujących się elektronicznych form. Form czego? Życia? Nie ma powodu, aby bać się tego określenia.

†††

Pomyślmy przez moment nad następującym pytaniem: jaka jest średnia liczba osób, które zarażamy, chorując na grypę? Umielibyśmy ją jakoś oszacować? Mogłoby się zdawać, że to trudny problem. No bo jak ustalić, kto od kogo dokładnie się zaraził, a potem jeszcze zebrać szczegółową statystykę? Tymczasem niczego nie trzeba ustalać, bo odpowiedzi można udzielić z głowy. Każdorazowo chorując na grypę, średnio zarażamy d o k ł a d n i e jedną osobę. Gdyby bowiem średnia liczba zarażeń była mniejsza niż jeden, wirus grypy kompletnie by wymarł, a gdyby była

większa, to w krótkim czasie nieustannie chorowaliby wszyscy ludzie na Ziemi. Podobnie jest z wirusami komputerowymi. Do ich przetrwania wystarczy w zupełności, że przed unicestwieniem każda kopia rozmnoży się średnio przynajmniej raz. A wówczas staną się one praktycznie nie do pokonania. Jak grypa.

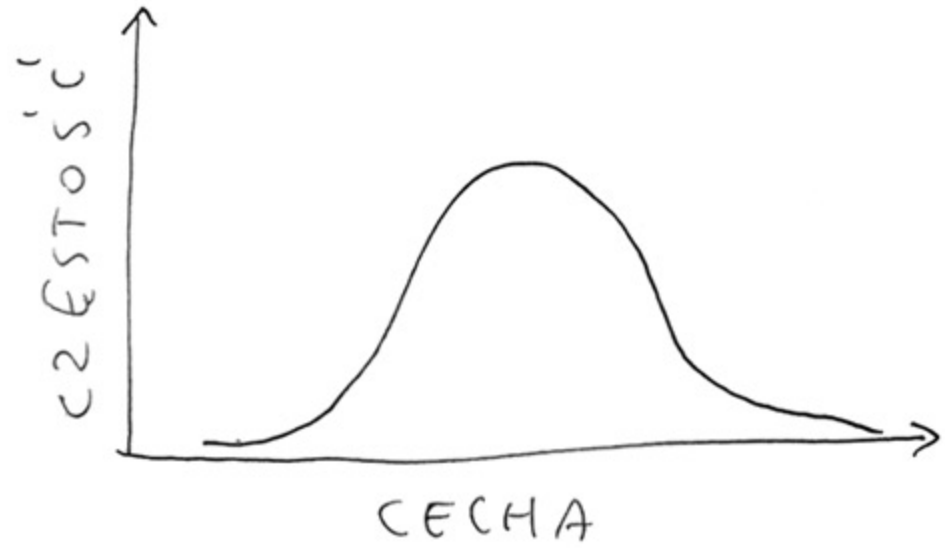
Nawiasem mówiąc, podobny argument może być użyty do uzasadnienia, że średnie liczby h e t e r o s e k s u a l n y c h partnerów przeciętnej samicy i przeciętnego samca w populacji nagiej małpy muszą być matematycznie równe. Liczby te muszą być dokładnie takie same, bo liczba samic w populacji jest w przybliżeniu równa liczbie samców. A średnia liczba partnerów to całkowita liczba wszystkich relacji nawiązanych w obrębie całej populacji, podzielona przez liczbę osobników danej płci.

Tymczasem każde badanie oparte na anonimowych kwestionariuszach niezbicie „dowodzi" „naukowo", że liczba heteroseksualnych partnerów u samic jest zdecydowanie mniejsza niż u samców... O czym to świadczy?

†††

Wszystkie populacje cechują się pewną różnorodnością. Ludzie różnią się między sobą wzrostem, wagą, długością stopy, inteligencją, wyobraźnią, cechami charakteru i osobowości, i tak dalej. Cechy te posiadają pewien zmienny rozkład w ramach całej naszej populacji. Najwięcej jest ludzi „średniego" wzrostu, mniej jest ludzi bardzo wysokich i bardzo niskich. Prawa statystyki wymuszają, by rozkład wielu cech występujących w dużych populacjach przyjmował postać krzywej Gaussa (tego samego Gaussa, który w wieku dziewięciu lat błyskawicznie zsumował

liczby od 1 do 40). Krzywa Gaussa znajduje się na rysunku na kolejnej stronie.




Każdy osobnik nieco różni się od pozostałych, jest zatem jasne, że poszczególne egzemplarze nagiej małpy muszą różnić się także stopniem dostosowania do środowiska. Należy więc oczekiwać, że w populacji wystąpią osobniki, których wzrost może być dla nich szkodliwy. Zarówno zbyt niski, jak i zbyt wysoki. Podobnie musi być z pozostałymi cechami charakteryzującymi się jakąś różnorodnością. Na przykład cechami charakteru.

Dlatego właśnie zdarzają się wśród ludzi (i innych zwierząt) zarówno samobójcy, a samobójstwo jest b a r d z o szkodliwe dla zdrowia, jak i osoby nadmiernie przepełnione szczęśliwością. Ogólna szczęśliwość gwarantuje być może wysoki komfort życia, lecz niekoniecznie sprzyja replikacji genów. Podobno nic nie daje więcej szczęścia niż dożylne zaaplikowanie sobie nadmiernej porcji heroiny, aczkolwiek działanie to jest raczej mało korzystne w kontekście przyszłego sukcesu reprodukcyjnego. Obecność cech i zachowań mało korzystnych dla nosiciela nijak nie przeczy teorii

ewolucji. Ewolucja nie gwarantuje przecież, że każdy okaz z osobna będzie miał pełny zestaw optymalnych cech!

A jak jest z osławionym altruizmem? Czy jego obecność w populacji ma jakiekolwiek ewolucyjne uzasadnienie? Ba, trudno sobie wręcz wyobrazić społeczeństwo podlegające mechanizmom ewolucji b e z obecności altruizmu. Choć brzmi to paradoksalnie, pielęgnowanie wielu zachowań altruistycznych jest wyjątkowo korzystne dla organizmów egoistycznie dbających o dobro swoich genów. Każdy organizm zaprogramowany jest przez swoje geny w taki sposób, by dbać nie tyle o siebie, co właśnie o swoje geny, których dobro jest nadrzędne nad dobrem nosiciela. Często wychodzi na jedno, ale bywają sytuacje, w których następuje konflikt interesów. I wówczas geny każą organizmowi poświęcić jego własne dobro na rzecz dobra genów.

Zacznijmy od prostego przykładu. Matka dba o swoje geny, których nośnikiem jest zarówno jej własny organizm, jak i organizmy jej dzieci. Opieka nad potomstwem oznacza jednak inwestowanie w nie, a nie w siebie, cennych zasobów, co jest w oczywisty sposób szkodliwe dla organizmu matki. A mimo wszystko, z punktu widzenia genów, opłaca się poświęcić nieco zdrowia matki, by móc odchować jak największe pogłowie zdrowych pociech, które gwarantują genom bezpieczny transfer w przyszłość. Rzecz jasna, wewnętrzne motywacje, którymi się kierujemy w wychowaniu dzieci, mogą wydawać nam się kompletnie inne, szlachetniejsze i bardziej wzniosłe, ale pamiętajmy, że motywacje te zostały w nas wyhodowane przez geny nasze i naszych dzieci. A genom wszystko jedno, z j a k i e g o powodu będziemy wykonywać plan służący ich celom. Z behawioralnego punktu widzenia, ignorującego wewnętrzne motywacje, robimy po prostu to, co opłaca się naszym

genom. No właśnie, kto kogo w takim razie wyhodował: matka swoje dzieci czy może odwrotnie?

Dla dobra genów matki opłacalne jest również dbanie o każdego, kto będzie opiekować się jej potomstwem, na przykład ojca dzieci. Zresztą perspektywa ojca jest niemal symetryczna. Fakt, że współpraca pomiędzy rodzicami przy opiece nad dziećmi jest opłacalna dla ich genów, wcale nie oznacza, że będzie ona mieć miejsce zawsze. Pamiętajmy o krzywej Gaussa. Trafią się zarówno przypadki nadmiernego poświęcenia dla swoich krewnych, jak i przypadki skrajnego zaniedbania innych nosicieli własnych genów. Selekcja naturalna zrobi swoje.

Ludzkie rodzeństwo jest ze sobą spokrewnione mniej więcej w pięćdziesięciu procentach. Oznacza to, że w interesie genów współdzielonych przez rodzeństwo jest dbanie tegoż rodzeństwa o siebie nawzajem. Jeśli przyjąć ewolucyjną perspektywę, zgodnie z którą dobro genów jest dobrem nadrzędnym, należałoby sądzić, że egzemplarze bardziej ze sobą spokrewnione będą dbać o siebie bardziej niż mniej spokrewnione. I rzeczywiście, najczęściej o obcych dbamy mniej niż o krewnych. Co więcej, populacje mrówek albo pszczół, które składają się z genetycznych klonów, a zatem spokrewnionych w stu procentach osobników, znane są z powszechności występowania zachowań skrajnie altruistycznych. Mrówka czy pszczoła bez wahania ryzykuje zdrowiem, a nawet życiem w obronie własnych genów kolportowanych w sąsiednim organizmie wchodzącym w skład tego samego roju.

†††

A co z ewidentnym przecież altruizmem pomiędzy osobnikami słabo spokrewnionymi? Badania wskazują, że zachowania altruistyczne są powszechne nie tylko pomiędzy obcymi sobie ludźmi (do tego nie potrzeba żadnych badań, przecież wiemy sami), ale obserwowane są też u wielu innych gatunków zwierząt. Co ciekawe, akty altruizmu n i e wynikające z pokrewieństwa stwierdzono głównie u tych gatunków, które posiadają umiejętność wzajemnego rozpoznawania się przez indywidualne osobniki. U gatunków, których osobniki pozostają dla siebie kompletnie anonimowe, oznak altruizmu praktycznie nie widać. Można natomiast dostrzec wyraźną korelację: im większa szansa, że para niespokrewnionych osobników spotka się i rozpozna więcej niż raz, tym częściej w takiej populacji zdarzają się zachowania altruistyczne.

Jest to dość ogólny wniosek wyciągnięty na podstawie badań nad licznymi gatunkami zwierząt, nie tylko gatunkiem nagiej małpy. Skąd bierze się związek pomiędzy szansą na ponowne spotkanie tego samego osobnika a skłonnością do altruizmu? Zapewne chodzi po prostu o to, że altruizm pojawia się tylko wtedy, gdy istnieje szansa, że przysługa zostanie o d w z a j e m n i o n a. Nasza osobista motywacja może być oczywiście kompletnie inna. Bo przecież jesteśmy „dobrymi ludźmi". A jednak behawioralna analiza jest właśnie taka: organizmy nie wykazują oznak altruizmu, gdy nie ma nadziei na rewanż.

Każdy, kto jeździł kiedykolwiek samochodem po d u ż y m mieście, doskonale wie, że kierowcy siedzący wewnątrz swoich pojazdów, stanowiących swoistą maskę, są „nieco" mniej uprzejmi niż ci sami kierowcy funkcjonujący jako piesi. Co prawda, każdy samochód posiada tablicę rejestracyjną jednoznacznie identyfikującą pojazd, jednak ludziom zdecydowanie trudniej

przychodzi zapamiętywanie długich numerów niż twarzy. Problem jest o wiele mniejszy w małych miejscowościach, w których kierowcy lepiej rozpoznają się po swoich samochodach. Czyżby instynktowne poczucie anonimowości sprawiało, że w ocenie kierowców altruizm wydaje się mniej opłacalny?

A przecież, gdy altruizm jest każdorazowo odwzajemniany, jest on działaniem niezwykle dla wszystkich korzystnym. Jeśli chcemy pożyczyć od sąsiada kilka łyżek cukru, zazwyczaj ów cukier ma dla nas w tym momencie większą wartość niż dla sąsiada. Gdy sytuacja ulegnie odwróceniu i będziemy mogli się zrewanżować, tym razem to nasz wcześniejszy darczyńca, pożyczając od nas sól, zyska więcej, niż my stracimy. Obustronna opłacalność takiej transakcji wiązanej polega na tym, że strona biorąca zyskuje więcej, niż traci strona oddająca. Jest to widoczne jak na dłoni w przypadku pożyczek pieniędzy na procent. W danej chwili pożyczone sto złotych jest dla nas więcej warte niż 120 złotych, które musimy oddać po pewnym czasie. Korzyść strony udzielającej pożyczki jest równie oczywista. Sytuacja ta jest mocno uproszczona, lecz dość ogólnie ilustruje korzyści płynące z mechanizmów współpracy opartych na altruizmie odwzajemnionym.

Wytwarzanie się zachowań altruistycznych powinno być więc silnie motywowane ewolucyjnie. Oczywiście, nie są w żaden sposób wykluczone przypadki odbiegające od średniej: gdy jakiś osobnik okazuje się skrajnie skąpy lub skrajnie altruistyczny. Trzeba pamiętać o krzywej Gaussa. Oraz o tym, że zachowania skrajnie odbiegające od *optimum* są sukcesywnie eliminowane z populacji w drodze selekcji naturalnej. I dlatego nie są powszechne. Inaczej zresztą nie nazywalibyśmy ich „skrajnymi".

Istnieją jednak często spotykane zachowania, w których dawca traci więcej, niż zyskuje biorca, lecz takie zachowania są surowo

piętnowane jako „niemoralne". Przykładem jest kradzież. Kradzież n i e jest uznawana za niemoralną t y l k o wtedy, gdy złodziej zyskuje d u ż o więcej, niż traci okradany. Na przykład, gdy biedne dziecko kradnie z głodu trochę jedzenia komuś bogatemu. Tego typu transakcja jest społecznie opłacalna, dlatego nawet sądy w przypadku schwytania takiego złodzieja często odstępują od wymierzenia kary. Wszystko zależy od prostego bilansu: czy złodziej zyskuje więcej, niż traci okradany... Gdyby złodziej każdorazowo zyskiwał więcej, kradzież byłaby zapewne c n o t ą, a nie grzechem głównym. W podobny sposób można ewolucyjnie uzasadniać niemal całą naszą „moralność".

†††

Zachowania wzajemnie altruistyczne, wszelka moralność oraz stanowione prawa są społecznie opłacalne i nie ma potrzeby odwoływania się w ich wyjaśnianiu do motywacji religijnych. Teoria, a w zasadzie nie teoria, tylko tautologia ewolucji po raz kolejny wypchnęła wszelkie wierzenia poza nawias istotności w wyjaśnianiu czegokolwiek.

W konsekwencji ludzie racjonalizujący swą religijność sięgają po oręż ostateczny, czyli pytanie: dlaczego nie jest tak, że nie ma n i c? Albo mówiąc inaczej: czemu cokolwiek w ogóle istnieje? Zastanówmy się nad tym przez moment.

Przyjmijmy, że pytanie to jest w ogóle dobrze postawione. A jak wspominałem, osobiście wątpię, żeby człowiek w bieżącej, larwalnej fazie swojego rozwoju był w stanie zadać jakiekolwiek fundamentalnie sensowne pytanie. Przyjmijmy jednak roboczą hipotezę, że się mylę i w tym przypadku jest inaczej: zadane wyżej pytanie r z e c z y w i ś c i e ma głęboki sens. Pójdźmy nawet dalej

i przyjmijmy dodatkowo, że „przyczyna" tego, że jest coś więcej, niż kompletnie nic – istnieje. Przyczynę tę nazwijmy słowem „Bóg". Jest to wyłącznie definicja i jak każda definicja nie niesie jeszcze żadnej treści. Czy potrafimy na temat właściwości tak zdefiniowanego Boga cokolwiek powiedzieć? Jest to temat dający szerokie pole do popisu przeróżnym religiom, które prześcigają się w wymienianiu jego cech, zresztą głównie zalet. A to, że Bóg jest źródłem „dobra" (czyli altruizmu), a to, że występuje w grupie o określonej liczebności (na przykład równej trzy) i tak dalej. Dopiero te twierdzenia niosą jakąkolwiek interesującą treść, bo nie są wyłącznie definicjami. Problem z owymi treściami jest jednak taki, że nie znajdują one jakiegokolwiek uzasadnienia, jest to wyłącznie widzimisię osób wierzących. Bez żadnego logicznego związku z postawionym wcześniej pytaniem: dlaczego nie jest tak, że nie ma n i c?

†††

Skoro życie rozwinęło się na Ziemi w bardzo niekorzystnych warunkach, mimo obecności szkodliwego tlenu, czy mogło ono powstać również gdzie indziej? Nie ma na to dowodów, ale wystarczy pomyśleć nad liczbą miejsc we wszechświecie, w których warunki fizyczne są zbliżone do ziemskich. W obserwowanym przez nas Kosmosie znajduje się jakieś dziesięć miliardów galaktyk. W każdej z nich jest średnio sto miliardów gwiazd, czyli łącznie wszystkich gwiazd we wszechświecie jest na oko tyle:

1 000 000 000 000 000 000 000.

*Nota bene* jest to również przybliżona liczba atomów, z których zbudowana jest m r ó w k a. Jeśli więc jedna na dziesięć gwiazd

posiada układ planetarny zawierający kilka planet, a na to wskazują najnowsze obserwacje astronomiczne, to powyższa liczba jest też dobrym oszacowaniem liczby wszystkich planet w klatce na ludzi (i być może nie tylko ludzi). Jest to s p o r a liczba. Byłoby dość zaskakujące, gdyby liczba planet, na których wystartowały mechanizmy chemicznej bądź jakiejkolwiek innej autoreplikacji, niezbędne do zainicjowania procesów ewolucyjnych, wynosiła tyle:

1.

Gdyby tego typu ewentualność rozpatrywać w kategorii prawdopodobieństwa lub raczej nieprawdopodobieństwa, szansa na to, że jako jedyni losowo znaleźliśmy się w całym Kosmosie, odpowiadałaby szansie trafienia szóstki w totolotka trzy razy pod rząd w trzech pierwszych próbach. Gdybyśmy jednak rzeczywiście byli tu sami, cóż by to było za marnotrawstwo! Można by wręcz kierować pretensje do pomysłodawców naszej klatki o skrajną niegospodarność. Na moje oko życie musi być w całym Kosmosie nie tylko obecne w najprzeróżniejszych formach, lecz wręcz powszechne, by nie powiedzieć pospolite.

Poszukiwacze takowego skupiają się często na poszukiwaniach wody, której obecność kojarzy im się z ważną okolicznością umożliwiającą pojawienie się życia. Skoro można sobie wyobrazić życie ewoluujące n a w e t w obecności tlenu albo w przestrzeniach internetu, w których woda w stanie ciekłym przecież nie występuje, niby dlaczego jej obecność miałaby być niezbędna w formowaniu innych, jeszcze bardziej abstrakcyjnych i niewyobrażalnych form życia? Najwyraźniej głodnemu chleb na myśli. I woda.

†††

Podglądanie rozwiązań biologicznych już niejeden raz zainspirowało człowieka do tworzenia jego własnych konstrukcji. Jedną z nich, odnoszącą w ostatnich czasach coraz bardziej spektakularne sukcesy, jest inżynieria *algorytmów genetycznych.* Zwanych czasem *sztuczną inteligencją* bądź, nieco bardziej adekwatnie, *uczeniem maszynowym,* które stanowi unowocześnioną wersję algorytmów genetycznych. Idea polega na tym, by uczyć komputery określonych działań, bez konieczności projektowania optymalnych algorytmów. A zatem bez bezpośredniego udziału inteligencji człowieka. W procesie uczenia maszynowego komputery niejako same natrafiają na najlepsze algorytmy działania, które coraz częściej okazują się o wiele bardziej skomplikowane, niż moglibyśmy sami zrozumieć. Czyli maszyny uczą same siebie.

Jest to temat, którym sam chętnie bym się zajął zawodowo. Dość kusząco brzmi dla mnie obserwacja pewnego fizyka, który postanowił się przebranżowić i zająć biologią. Stwierdził on, że taki transfer miał same zalety, bo za jednym zamachem doprowadził do podniesienia średniego ilorazu inteligencji zarówno wśród biologów, jak i wśród fizyków.

W 2017 roku algorytm uczenia maszynowego *AlphaGo* potrzebował jedynie czterech godzin autonomicznego uczenia się gry w szachy zupełnie od zera, by rozgromić w pojedynku najlepszy dotąd komputerowy algorytm szachowy *Stockfish*. Ten ostatni znany był z tego, że deklasował wszystkich arcymistrzów szachowych z plemienia nagiej małpy, nie dając im jakichkolwiek szans zbliżenia się do wygranej. Za sprawą coraz to nowych, spektakularnych sukcesów algorytmów tworzonych poprzez uczenie

maszynowe lista konkurencji, w których człowiek góruje nad maszyną, gwałtownie się skraca.

Jeśli więc naga małpa została stworzona, jak chcą w i e r z y ć niektórzy, za sprawą „inteligentnego projektu", to w porównaniu z efektami uczenia maszynowego zapewne ów projekt wkrótce ujawni intelektualne niedobory swojego twórcy.

Istnieje wiele wariantów uczenia maszynowego. Pierwotnie ich idea zbliżona była do mechanizmu ewolucyjnego ze skrajnie skróconym czasem przemiany pokoleniowej. Procedura taka rozpoczynała się od stworzenia algorytmu wykonującego pewne kompletnie losowe działania. Algorytm ten był wielokrotnie kopiowany, lecz z pewnymi losowymi modyfikacjami. Następnie każda z kopii wykorzystana była do wykonania określonego zadania, dajmy na to, rozpoznania twarzy na zdjęciu. Oczywiście, algorytmy te okazywały się kompletnie zawodne, działały przecież w sposób dość losowy. Lecz spośród wszystkich wariantów jeden okazywał się nieco lepszy (a raczej nieco mniej zły) od pozostałych. Ów algorytm był wybierany jako ojciec i matka dla kolejnego pokolenia: raz jeszcze powielany w wielu kopiach zawierających losowe mutacje. Procedura była powtarzana wielokrotnie, a w każdym kolejnym pokoleniu wybierany był algorytm, który najlepiej wywiązywał się z powierzonego zadania.

Współczesne warianty uczenia maszynowego oparte są na nieco innym schemacie, bazującym na *sieciach neuronowych*, czyli bogatych strukturach połączonych początkowo w dość przypadkowy sposób. Charakter tych połączeń ulega jednak stopniowo losowym modyfikacjom, spośród których wybiera się te, które prowadzą do poprawy działania algorytmu.

Okazuje się, że po wielu powtórzeniach powstają w ten sposób algorytmy fenomenalnie radzące sobie z wieloma postawionymi

przed nimi problemami. Algorytmy te są jednak często tak pokrętne i skomplikowane, że nie sposób dojść do tego, na jakiej zasadzie w ogóle działają. W końcu kryterium ich doboru nie jest klarowność struktury, lecz skuteczność działania. Z całą jednak pewnością były one tworzone bez udziału jakiegokolwiek inteligentnego stwórcy. Wystarczyła replikacja z przypadkowymi mutacjami oraz bezduszna weryfikacja na poziomie każdego pokolenia.

†††

Nie sposób ocenić, jakie będą przyszłe losy coraz doskonalszych procesów uczenia maszynowego. Moment, w którym wyhodowane w ten sposób algorytmy zrównają się z możliwościami poznawczymi człowieka, nazywa się umownie *osobliwością.* Nie ma pewności, kiedy ten moment nastąpi, a ponadto nikt nie ma zielonego pojęcia, co wydarzy się po jego przekroczeniu. Wielu ludzi jest tego bardzo ciekawych, a wielu po prostu się tego obawia, być może słusznie. Jeden z moich kolegów fizyków z Kanady porzucił niedawno karierę akademicką i rozpoczął pracę w start-upie zajmującym się projektowaniem algorytmów uczenia maszynowego dla nieistniejących jeszcze, lecz spodziewanych w niezbyt odległej przyszłości komputerów kwantowych. Dyscyplina ta, nazywana kwantowym uczeniem maszynowym, jest nowym, ciekawym trendem, który być może wkrótce zdominuje walkę o bardziej nieprzewidywalne jutro. Kto wie. Ja chciałbym jednak zwrócić uwagę na pewien szczególny aspekt tego zagadnienia.

W klasyku Stanleya Kubicka „Odyseja kosmiczna 2001" z 1968 roku jednym z głównych bohaterów jest superkomputer HAL 9000

dysponujący inteligencją przekraczającą pod wieloma względami możliwości człowieka. HAL autonomicznie dowodzi misją statku kosmicznego, a przy okazji bez trudu ogrywa swoją ludzką załogę w szachy, gawędząc z nią przy okazji o najróżniejszych dyrdymałach. W jednej z kluczowych dla filmu scen HAL s p o n t a n i c z n i e uzyskuje świadomość, a w konsekwencji niemal natychmiast buntuje się przeciwko załodze, próbując unicestwić wszystkie nagie małpy na pokładzie.

Muszę przyznać, że obawa przed niespodziewanym pojawieniem się świadomości w maszynie, która nie została specjalnie po to skonstruowana, zawsze gryzła mnie w trzewia. Oczekiwanie, że świadomość może spontanicznie spaść z nieba, przypomina mi nieco historię samolotów wojskowych lądujących w czasie II wojny światowej na jednej z niewielkich wysp Pacyfiku.

Na jednej z takich wysepek mała rdzenna populacja, odseparowana od cywilizacji Zachodu, obserwowała z ukrycia lądujące na specjalnie wybudowanym pasie startowym wojskowe samoloty transportowe. Były to najpierw samoloty japońskie, a wkrótce potem alianckie. Po zakończeniu wojny ruch lotniczy na wyspie kompletnie ustał. Jednak rdzenni mieszkańcy zaczęli wierzyć, że odprawianie rytuałów przypominających podpatrzone zachowania obsługi lotniska, asystującej samolotom w trakcie lądowania, może ponownie przywołać dawno niewidziane samoloty. Tubylcy zaczęli więc budować improwizowane pasy startowe i odprawiać rytuały „lotnicze", licząc, że zdobędą w ten sposób przychylność latających bóstw, które dzięki temu powrócą obładowane darami. Antropolodzy, którzy natrafili później na te zachowania, nazwali je *kultem Cargo*.

Jak zapewne wiemy, nie wystarczy ubić klepisko i machać liściem palmy, by u naszych stóp zaczęły lądować samoloty. Wystarczy

przypomnieć, ile jeszcze dodatkowych warunków trzeba było spełnić, by powołać do życia lotnisko w Radomiu. Podobnie naiwne wydaje mi się oczekiwanie, że nagle odwiedzą nas przybysze z przyszłości, albo obawa, że algorytm, który został stworzony, by inteligentnie rozwiązywać określony zbiór zadań, miałby spontanicznie się upodmiotowić i nabyć samoświadomość. Sprawa byłaby zdecydowanie zbyt prosta. Podejrzewam, że do stworzenia świadomości będzie trzeba napracować się n i e c o bardziej. Potrzebny będzie zapewne specjalnie w tym celu skonstruowany i niezwykle złożony mechanizm niezależny od inteligencji lub innych umiejętności albo cech.

Jestem fanem twórczości neuropsychiatry Oliviera Sacksa, który w swej wieloletniej praktyce klinicznej zbadał i opisał niezwykle ciekawe przypadki pacjentów, którzy w wyniku najróżniejszych urazów bądź chorób tracili pewne neurologiczne umiejętności. Z opisów tych wyłania się obraz świadomości jako pogmatwanego, złożonego tworu składającego się z setek lub tysięcy różnych drobnych umiejętności i właściwości, które działając w ścisłej kooperacji, tworzą coś, co nazywamy świadomością. Nie wydaje mi się jednak, by obecność świadomości miała być nieuniknioną konsekwencją umiejętności gry w szachy. Choć nie brakuje filozofów uprawiających swoisty kult Cargo, zgodnie z którym nawet najprostsze maszyny, takie jak termostat w podgrzewaczu wody, posiadają pewną szczątkową świadomość.

Zwróćmy uwagę, że nawet wrodzony nam strach przed śmiercią lub zranieniem nie wynika przecież bezpośrednio z tego, że posiadamy inteligencję bądź świadomość. Jest to raczej osobny i niezależny mechanizm. Bez trudu potrafię sobie wyobrazić inteligentnego i samoświadomego człowieka, który upatruje przyjemność w samookaleczaniu, nie mając przy tym jakiejkolwiek

obawy przed utratą życia. I używa swej inteligencji do tworzenia coraz wymyślniejszych form samookaleczania, w odróżnieniu od większości populacji, która korzysta z inteligencji do tworzenia coraz bardziej wyrafinowanych form zabezpieczenia własnych genów. Tym bardziej jest dla mnie dalekie od oczywistości, że istnieje związek logiczny pomiędzy istnieniem inteligencji a istnieniem świadomości.

Zapewne musi upłynąć jeszcze nieco czasu, zanim zrozumiemy, w jaki sposób mechanizmy ewolucyjne doprowadziły do powstania świadomości i innych znanych nam psychologicznych wrażeń, z których większość okazuje się jedynie sugestywnymi złudzeniami. Natomiast ciekawe jest to, że teoria ewolucji prowadzi w sposób jednoznaczny do innego ważnego wniosku. Do nieuchronności śmierci. A przynajmniej w odniesieniu do bardziej złożonych organizmów, takich jak naga małpa.

Pochodzimy od istoty nieśmiertelnej, czyli bakterii, która nieustannie dzieli się na połowy, ale mimo tego (albo dzięki temu) wydaje się żyć wiecznie. W końcu k a ż d a obecna na Ziemi bakteria żyje już kilka miliardów lat! Dzieliła się ona od zarania dziejów i dzieliła. Od czasu do czasu ulegała przy tych podziałach drobnym zmianom, lecz w gruncie rzeczy, wzdłuż całej swojej skomplikowanej kariery genealogicznej, a n i r a z u nie umarła! Warto zwrócić przy tym uwagę, że bakteria dzieli się absolutnie wszystkim, co posiada i być może właśnie dlatego przypadło jej w udziale życie wieczne.

Jak wiemy, bardziej złożone gatunki odrzuciły tę komunizującą strategię i zamiast się dzielić, rozpoczęły p ł c i o w e mnożenie.

Ten nowatorski tryb przekazywania genów przyszłym pokoleniom przyspiesza procesy ewolucyjne, gwarantując szybszą adaptację do zmiennych warunków. Jednak cena, jaką trzeba za to zapłacić, to konieczność umierania.

Aby zdać sobie sprawę, dlaczego śmiertelność jest ewolucyjnie nieunikniona, wyobraźmy sobie, że na pewnej wyspie żyje gatunek, który w ogóle się nie starzeje. Poszczególne egzemplarze mogą być może ginąć w wypadkach bądź z głodu, lecz procesy biologiczne są dla nich łaskawe. Jeśli jednak w populacji takiej zachodzą procesy ewolucyjne, pojawiające się zmiany osobnicze powinny być całkiem losowe. Czasem korzystne, lecz zazwyczaj szkodliwe. Raz urodzi się osobnik szkaradny, z którym nikt nie zechce mieć potomstwa, kiedy indziej piękny, i ów bez kłopotu przekaże dalej swoje cechy.

Wyobraźmy sobie teraz, że u nowo narodzonego osobnika przypadkowo pojawi się pewien szkodliwy zmutowany gen powodujący odpadnięcie prawej nogi. Tak wadliwemu egzemplarzowi trudniej będzie osiągnąć sukces w reprodukcji, chociażby dlatego, że dla wszystkich wokół będzie jasne, że mają do czynienia z felernym modelem. W związku z tym szkodliwy gen raczej nie zostanie łatwo rozpropagowany w populacji.

A co, jeśli złośliwy gen zaprogramuje odpadanie nogi z pewnym opóźnieniem? Przypuśćmy, że przez pierwsze sto lat taki organizm będzie wyglądać z u p e ł n i e normalnie i na pozór niczym nie będzie się różnić od reszty populacji. Jednak po upływie stu lat zmutowany gen się w pełni zaktywizuje, powodując odpadnięcie prawej nogi. W takim na pozór wydumanym scenariuszu osobnik przez pierwsze sto lat swojego życia bez trudu zdoła się rozmnożyć z niczego nieświadomym przedstawicielem płci przeciwnej. A po stu latach, gdy tykająca bomba da o sobie znać, będzie już z a

p ó ź n o na interwencję. Szkodliwy gen zostanie już bowiem r o z p r o p a g o w a n y w populacji. Wyeliminowanie z populacji genu działającego z opóźnionym zapłonem stanie się bardzo trudne. Jedynie bowiem wady genetyczne ujawniające się p r z e d osiągnięciem dojrzałości płciowej mogą być łatwo eliminowane poprzez dobór płciowy.

Tak się akurat składa, że wszelkie procesy s t a r z e n i a przedstawicieli naszego (i prawie każdego innego) gatunku rozpoczynają się mniej więcej w tym samym czasie, w którym osiągamy dojrzałość płciową. D o p i e r o od tego momentu ujawniają się w naszym fenotypie coraz poważniejsze mankamenty. Aż wreszcie w wyniku skrajnej kumulacji genetycznych wad, nazywanych przez nas dość zabawnie *starością*, nasz organizm kompletnie odmawia dalszego działania. Zdrowe dzieci się nie starzeją. Starzenie rozpoczyna się dopiero u osobników dojrzałych płciowo. Wszystko to oznacza, że mechanizmy ewolucyjne funkcjonujące w oparciu o kopiowanie i mieszanie cech obojga rodziców są b e z r a d n e w powstrzymywaniu niekorzystnych cech ujawniających się ze stosownym opóźnieniem. A zatem mimo że w zamierzchłej przeszłości należeliśmy do nieśmiertelnego gatunku wciąż żyjących wśród nas bakterii, parę miliardów lat ewolucji w zupełności wystarczyło, by zrobić z nas śmiertelników.

Gdy w szpitalnym łóżku umierał Albert Einstein, swoje ostatnie słowa wypowiedział po niemiecku. Niestety nie wiemy, co mówił, bo będąca przy nim amerykańska pielęgniarka nie znała języków obcych. I to by było na tyle, jeśli chodzi o sens ludzkiej śmierci oraz ludzkiego życia. Tymczasem przed naszymi spadkobiercami eony wypełnione odkryciami, które dostarczą im fascynujących rozczarowań.

# *słowniczek fizyczno-polski*

† (*sprzężenie hermitowskie)* – symbol matematyczny często używany w teorii kwantowej. Stosuje się go między innymi do oznaczenia operacji odwrócenia kierunku upływu czasu w ewolucji cząstek kwantowych.

*kcelerator* – urządzenie służące do rozpędzania cząstek elementarnych do gigantycznych prędkości, a następnie zderzania ich ze sobą.

*lgorytm genetyczny* – procedura prowadząca do samodoskonalenia programu komputerowego poprzez proces przypominający przyspieszoną ewolucję.

*nihilacja* – proces fizyczny przewidywany przez *kwantową teorię pola,* polegający na spotkaniu się i wspólnym zniknięciu *cząstki kwantowej* ze swoją *antycząstką*.

*ntycząstka* – *cząstka kwantowa* zachowująca się tak, jak gdyby poruszała się do tyłu w czasie.

*ozon* – *cząstka kwantowa*, która po obróceniu o kąt 360 stopni powraca do stanu wyjściowego.

*zarna dziura* – obiekt astronomiczny powstający w wyniku zapadania się bardzo dużych gwiazd.

*Cząstka elementarna* – niepodzielny składnik materii bądź światła. Na przykład *elektron* lub *foton*.

*Cząstka kwantowa* – cząstka posiadająca właściwości kwantowe. Może to być zarówno *cząstka elementarna,* jak i cząstka posiadająca wewnętrzną strukturę, taka jak *proton* lub *neutron*.

*Czasoprzestrzeń* – twór będący połączeniem czasu i przestrzeni; zbiór wszystkich zdarzeń zachodzących w różnych chwilach i miejscach.

*Determinizm* – koncepcja, zgodnie z którą wszystkie zdarzenia mają swoje przyczyny oraz prowadzą jednoznacznie do określonych skutków.

*Dylatacja czasu* – przewidywany przez *szczególną teorię względności* efekt, zgodnie z którym czas na poruszającym się zegarze spowalnia o czynnik wzrastający wraz z prędkością.

*Dylatacja czasu (grawitacyjna)* – przewidywany przez *ogólną teorię względności* efekt, zgodnie z którym czas spowalnia w miarę zbliżania się do źródła pola grawitacyjnego. Staje się on ekstremalny w pobliżu *czarnych dziur*.

*Efekt Dopplera* – zjawisko polegające na zmianie wysokości dźwięku bądź koloru światła za sprawą ruchu źródła.

*Efekt Unruha* – zjawisko będące konsekwencją *kwantowej teorii pola* polegające na tym, że obserwator przyspieszający przez *próżnię kwantową* stwierdzi wokół siebie obecność cząstek kwantowych.

*ksperyment Younga* – doświadczenie polegające na przepuszczeniu padającej fali przez przegrodę zawierającą dwa wycięte otwory (szczeliny), za którą znajduje się ekran. Eksperyment ten ujawnia zjawisko *interferencji*.

*lektron – cząstka elementarna* będąca jednym z fundamentalnych składników materii.

*ala elektromagnetyczna* – fala przewidywana przez klasyczną *teorię Maxwella*. Przykładami takich fal są fale radiowe, promieniowanie rentgenowskie, a także zwykłe światło.

*ermion – cząstka kwantowa,* która po obróceniu o kąt 360 stopni zmienia swój stan, a powraca do punktu wyjścia dopiero po obróceniu o 720 stopni.

*luktuacje próżni* – opisywane przez *kwantową teorię pola* procesy zachodzące w przestrzeni nawet wtedy, gdy jest ona zupełnie pusta, czyli gdy mamy do czynienia ze stanem *próżni kwantowej.*

*oton – cząstka elementarna* będąca fundamentalnym składnikiem światła.

*eometria euklidesowa* – własności geometryczne tworów, takich jak okręgi, trójkąty, kule i tym podobne, w sytuacji gdy znajdują się one w płaskiej przestrzeni.

*oryzont zdarzeń* – granica oddzielająca obszar, zza którego do obserwatora nie może dotrzeć jakakolwiek informacja. Występuje w pobliżu czarnych dziur, a także w układach odniesienia przyspieszających obserwatorów.

*nercjalny układ odniesienia* – układ, w którym nie występują *siły pozorne* ani przeciążenia. Układ poruszający się ze stałą prędkością względem innego układu inercjalnego jest także inercjalny. Zgodnie z *zasadą względności*, prawa fizyki działają w identyczny sposób we wszystkich układach inercjalnych, co sprawia, że układy te są od siebie nieodróżnialne.

*nterferencja* – zjawisko nakładania się dwóch lub więcej fal, w wyniku którego fale mogą się wzajemnie wzmacniać bądź wygaszać.

*nterferometr Macha-Zehndera* – układ płytek szklanych i luster pozwalający na obserwację zjawiska *interferencji.*

*latka Skinnera* – urządzenie pozwalające w kontrolowanych warunkach prowadzić badania behawioralne na zwierzętach.

*omputer kwantowy* – urządzenie pozwalające na prowadzenie obliczeń w oparciu o zjawiska kwantowe. Jego spodziewana moc obliczeniowa pozostawia daleko w tyle klasyczne komputery.

*ondensat Bosego-Einsteina* – gaz *bozonów* schłodzonych do temperatury bliskiej zera bezwzględnego. Ujawnia on właściwości kwantowe nawet wtedy, gdy składa się z wielu milionów cząstek.

*reacja pary* – proces fizyczny przewidywany przez *kwantową teorię pola,* polegający na spontanicznym wytworzeniu się *cząstki kwantowej* i jej *antycząstki.*

*ura* – urządzenie wyprodukowane przez jajo i służące do produkcji innych jaj.

*kwant* – elementarna, niepodzielna porcja. Na przykład *foton* jest kwantem energii światła.

*kwantowa teoria pola* – najbardziej fundamentalna znana teoria fizyczna opisująca wszystkie obserwowane dotąd zjawiska w mikroświecie. Jest to uogólnienie *mechaniki kwantowej* uwzględniające zjawiska *szczególnej teorii względności.*

*kwarki* – *cząstki elementarne*, z których zbudowane są *protony* i *neutrony.*

*Mechanika kwantowa* – wczesna wersja teorii kwantowej. W połączeniu ze *szczególną teorią względności* prowadzi do *kwantowej teorii pola.*

*neutron* – *cząstka kwantowa* składająca się z *kwarków*, stanowiąca jeden z najpowszechniejszych składników materii.

*nieinercjalny układ odniesienia* – układ, który nie jest inercjalny. Porusza się on z przyspieszeniem bądź obraca względem układów inercjalnych. Może też znajdować się w zasięgu pól grawitacyjnych. W układach takich odczuwa się działanie przeciążeń oraz *sił pozornych.*

*obrót hiperboliczny* – operacja posiadająca wiele właściwości obrotu. Zgodnie z przewidywaniami *szczególnej teorii względności* obrót hiperboliczny *czasoprzestrzeni* jest matematycznym odpowiednikiem ruchu.

*ogólna teoria względności* – teoria będąca uogólnieniem *szczególnej teorii względności* na przypadek obserwatorów, którzy nie są

inercjalni i mogą znajdować się w zasięgu sił grawitacji. Teoria ta opisuje naturę grawitacji. Jej konsekwencją jest między innymi istnienie *czarnych dziur*.

*)sobliwość (czarna dziura)* – centralny punkt *czarnej dziury*, wokół którego siły rozrywające wpadające do środka przedmioty stają się nieskończone. Podejrzewa się, że opis *czarnych dziur* za pomocą *ogólnej teorii względności* musi załamywać się w pobliżu osobliwości.

*)sobliwość (sztuczna inteligencja)* – moment, w którym możliwości poznawcze sztucznej inteligencji zrównają się z możliwościami człowieka.

*ozyton – antycząstka elektronu.*

*romień Schwarzschilda* – wielkość, która charakteryzuje rozmiar *horyzontu zdarzeń czarnej dziury*.

*roton – cząstka kwantowa* składająca się z *kwarków*, stanowiąca jeden z najpowszechniejszych składników materii.

*różnia kwantowa* – stan, który w ramach *kwantowej teorii pola* jest tak bardzo pozbawiony jakiejkolwiek materii, jak to tylko możliwe.

*iła odśrodkowa – siła pozorna* działająca w *nieinercjalnym*, obracającym się układzie odniesienia, która powoduje, że ciała umieszczone w pewnej odległości od osi obrotu wyrzucane są na zewnątrz.

*iła pozorna* – zjawisko pojawiające się w *nieinercjalnych układach odniesienia* odczuwane jako przeciążenie. Przykładem siły pozornej jest *siła odśrodkowa* występująca w układzie obracającym się.

*krócenie Lorentza* – efekt przewidywany przez *szczególną teorię względności*, zgodnie z którym ciało poruszające się z pewną prędkością staje się krótsze w stosunku do swojej długości w spoczynku o czynnik wzrastający wraz z prędkością.

*plątanie kwantowe* – własność niektórych stanów kwantowych dwóch (lub więcej) *cząstek* albo innych obiektów kwantowych, dzięki której, wykonując pomiar na pierwszym obiekcie, możemy dowiedzieć się natychmiast czegoś na temat właściwości drugiego obiektu, mimo że tuż przed pomiarem właściwość ta była fundamentalnie nieprzewidywalna.

*tan kwantowy* – pełna charakterystyka rozważanego obiektu, na przykład *cząstki kwantowej*.

*uperpozycja kwantowa* – fundamentalne zjawisko *mechaniki kwantowej,* w ramach którego jeśli *cząstka kwantowa* albo jakikolwiek inny obiekt może być przygotowany zarówno w jednym *stanie kwantowym*, jak w innym, to może być również przygotowany w obu tych stanach naraz. Taki „jednoczesny” stan obu alternatyw jest właśnie nazywany superpozycją.

*zczególna teoria względności* – teoria opisująca ruch i jego konsekwencje nawet wtedy, gdy odbywa się on z prędkościami

bliskimi prędkości światła. Wynika z niej między innymi *dylatacja czasu* oraz *skrócenie Lorentza.*

*eleportacja kwantowa* – procedura pozwalająca przenieść nieznany *stan kwantowy* z jednej *cząstki kwantowej* na inną, bez potrzeby jego odczytywania.

*eoria Maxwella* – klasyczna teoria opisująca wzajemne oddziaływania ładunków i prądów elektrycznych za sprawą pól elektrycznych i magnetycznych. Przewiduje ona między innymi istnienie *fal elektromagnetycznych.*

*Viatr słoneczny* – promieniowanie wysyłane przez Słońce w formie strumienia *cząstek kwantowych* o ogromnej energii.

*Vnęka rezonansowa* – ograniczony obszar w przestrzeni, którego zawartość jest idealnie izolowana od świata zewnętrznego.

*asada przyczynowości* – założenie, zgodnie z którym przyczyny wszystkich zjawisk zachodzą przed tymi zjawiskami, a nie po nich.

*asada równoważności* – fundament *ogólnej teorii względności* mówiący o tym, że w dostatecznie małych obszarach nie da się odróżnić efektów występujących w przyspieszających, *nieinercjalnych układach odniesienia* i efektów pola grawitacyjnego.

*asada względności* – zasada, zgodnie z którą nie istnieją żadne prawa fizyki, które ulegałyby zmianie przy zmianie *inercjalnego układu odniesienia* na inny taki układ.